

**EVALUACIÓN DE LA PROFUNDIDAD DEL ESTRATO DE SUELO EN SU
RESPUESTA SÍSMICA**

KELLY MARCELA AGUIRRE VARGAS

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GEOMÁTICA
SANTIAGO DE CALI
2016**

**EVALUACIÓN DE LA PROFUNDIDAD DEL ESTRATO DE SUELO EN SU
RESPUESTA SÍSMICA**

KELLY MARCELA AGUIRRE VARGAS

PROYECTO DE GRADO

**DIRECTOR
ALEJANDRO CRUZ**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GEOMÁTICA
SANTIAGO DE CALI
2016**

RESUMEN

Este proyecto tuvo como objetivo analizar la sensibilidad en la respuesta sísmica de diferentes perfiles de suelo al variar la profundidad hasta donde se determinan sus propiedades geotécnicas. Se desarrolló mediante la utilización de los perfiles estratigráficos obtenidos a través del estudio de la Microzonificación Sísmica de la ciudad de Santiago de Cali y la metodología de análisis lineal equivalente, para encontrar para cuál profundidad se obtiene mayor similitud, al comparar el parámetro de la Intensidad de Arias experimental y analítico de los acelerogramas del sismo de Pizarro (15 de Noviembre de 2004), mediante la aplicación de una función que indica la relación entre los dos parámetros.

La motivación para la realización del proyecto fue el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente en el cual se clasifica los perfiles de suelos de acuerdo a las características geotécnicas en sus 30 metros superiores, el parámetro más usado actualmente es la velocidad media de la onda de corte ($\overline{V_s}$). Lo anterior es importante debido a que el diseño y construcción de edificaciones basa su predicción del movimiento del terreno originado por un sismo en el V_{s30} .

De acuerdo a los resultados obtenidos se concluye que las características de amplificación de los depósitos tienden a disminuir con la profundidad, logrando buenas correlaciones entre la respuesta sísmica registrada y la modelada en profundidades superficiales, menores hasta a 30 m. Igualmente se resalta la importancia del contenido de las capas blandas en los perfiles de suelo cuando determinan la profundidad en la que se encuentra la roca, también las características de la roca, en especial el valor de V_s y la ubicación de la estación en roca respecto a las estaciones en suelo y de los perfiles. Por último se comparó los espectros de diseño de la NSR-10, MZSCali y los obtenidos a partir de la presente investigación, y se encontró que los espectros calculados eran superiores en su aceleración máxima en periodos menores a 1 s, también que la definición realizada en EUA de aceleración y los periodos inciden en gran medida en su resultado.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Descripción del problema	1
1.2 Formulación del problema	3
1.3 Objetivos	3
1.3.1 Objetivo General.....	3
1.3.2 Objetivos Específicos.....	3
1.4 Justificación.....	3
2. MARCO TEÓRICO	6
2.1. Intensidad de Arias.....	6
2.2. Velocidad de la onda de cortante (V_s).....	6
2.3. Curvas de degradación	7
2.4. Efectos de sitio	8
2.5. función de transferencia	8
2.6. Análisis lineal equivalente	8
2.7. Norma Colombiana Sismo Resistente	10
2.8. Modelo de basamento sísmico	11
3. ANTECEDENTES.....	13
4. METODOLOGÍA.....	21
4.1. Identificación de los perfiles estratigráficos.....	23
4.2. Selección de los registros sísmicos y estaciones.....	25

4.3.	Selección de perfiles estratigráficos.....	29
4.4.	Modelo de basamento sísmico	30
4.5.	Procedimiento para análisis de sensibilidad de cada perfil	32
4.6.	Espectros de respuesta y de diseño	33
5.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	35
5.1.	Análisis de sensibilidad.....	35
5.1.1.	Zona 4C	35
5.1.2.	Zona 4D	37
5.1.3.	Zona 5.....	39
5.1.4.	Zona 6.....	40
5.1.5.	Análisis de los resultados.....	42
5.2.	Espectros de respuesta y de diseño.....	43
5.2.1.	Zona 4C.....	44
5.2.2.	Zona 4D.....	45
5.2.3.	Zona 5	47
5.2.4.	Zona 6	48
5.2.5.	Análisis de los resultados	50
6.	CONCLUSIONES	52
7.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	54
ANEXO 1	58
ANEXO 2	62
ANEXO 3	66

ANEXO 4..... 68

ANEXO 5..... 76

ANEXO 6..... 80

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1 Clasificación de los perfiles de suelo (NSR-10, Tabla A.2.4-1).....	10
Tabla 2 Resumen de los sismos registrados en Cali.....	25
Tabla 3 Perfiles estratigráficos seleccionados para el análisis de sensibilidad.....	29
Tabla 4 Variación de la profundidad de cada perfil estratigráfico	30
Tabla 5 Señales de diseño seleccionadas	33
Tabla 6 Resumen de los resultados obtenidos	42
Tabla 7 Resumen de resultados de los espectros de diseño	50
Tabla 8 Valores de degradación del Módulo para materiales finos (Tabla 4.17, MZSCali, 2005)	58
Tabla 9 Valores de Amortiguamiento para materiales finos (Tabla 4.18, MZSCali, 2005)	59
Tabla 10 Valores de degradación del Módulo para materiales granulares (Tabla 4.19, MZSCali, 2005).....	60
Tabla 11 Valores de Amortiguamiento para materiales granulares (Tabla 4.20, MZSCali, 2005)	61
Tabla 12 Selección de los perfiles estratigráficos.....	66
Tabla 13 Datos del perfil estratigráfico Velódromo	76
Tabla 14 Datos perfil estratigráfico Canchas Panamericanas	76
Tabla 15 Datos del perfil estratigráfico INGEOMINAS	77
Tabla 16 Datos del perfil estratigráfico Pasoancho con Cr.80	77
Tabla 17 Datos del perfil estratigráfico Meléndez.....	78
Tabla 18 Datos del perfil estratigráfico Guadalupe.....	78

Tabla 19 Datos del perfil estratigráfico Navarro	78
--------------------------------------------------------	----

Tabla 20 Datos del perfil estratigráfico Floralia	79
---------------------------------------------------------	----

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1 Armenia 25 de Enero de 1999 (www.elpais.com.co).....	4
Figura 2 Curva de degradación del módulo de corte y amortiguamiento (MZSCali, 2005) .	7
Figura 3 Análisis lineal equivalente (Kramer, 1996)	9
Figura 4 Esquema del proceso de determinación del basamento sísmico (MZSCali, 2005).	12
Figura 5 Esquema de la metodología	22
Figura 6 Localización de perfiles promedio para la modelación de la respuesta sísmica (MZSCali, 2005).....	23
Figura 7 Perfil estratigráfico Velódromo P3 (MZSCali, 2005)	24
Figura 8 Aceleraciones del sismo de Pizarro	26
Figura 9 Aceleraciones del sismo de Toro	26
Figura 10 Aceleraciones del sismo de Calima	27
Figura 11 Distribución de las estaciones de acelerógrafos (RAC y Portátil) ubicadas en la ciudad de Cali que registraron el sismo de Pizarro. Las estrellas amarillas corresponden a las estaciones de la RAC y las estrellas rojas a las estaciones de la Red Portátil (Ojeda et al., 2004)	28
Figura 12 Espectro de amenaza uniforme en roca para la ciudad de Santiago de Cali....	34
Figura 13 FO IA vs. Vs en Roca para cada profundidad, Velódromo	36
Figura 14 FO IA vs. Vs en Roca para cada profundidad, Canchas Panamericanas.....	37
Figura 15 FO IA vs. Vs en Roca para cada profundidad, INGEOMINAS.....	38
Figura 16 FO IA vs. Vs en Roca para cada profundidad, PCR.80	38
Figura 17 FO IA vs. Vs en Roca para cada profundidad, Meléndez	40

Figura 18 FO IA vs. Vs en Roca para cada profundidad, Guadalupe	40
Figura 19 FO IA vs. Vs en Roca para cada profundidad, Navarro.....	41
Figura 20 FO IA vs. Vs en Roca para cada profundidad, Floralia.....	42
Figura 21 Espectros de diseño mediante EUA Velódromo.....	44
Figura 22 Comparación de Espectro de diseño Velódromo	45
Figura 23 Espectros de diseño mediante EUA INGEOMINAS	45
Figura 24 Comparación de Espectro de diseño INGEOMINAS	46
Figura 25 Espectros de diseño mediante EUA Pasoancho con Cr. 80.....	46
Figura 26 Comparación de Espectro de diseño Pasoancho con Cr.80	47
Figura 27 Espectros de diseño mediante EUA Meléndez	48
Figura 28 Comparación de Espectro de diseño Meléndez	48
Figura 29 Espectros de diseño mediante EUA Navarro	49
Figura 30 Comparación de Espectro de diseño Navarro.....	49
Figura 31 Registro acelerográfico CCAL5.....	62
Figura 32 Registro acelerográfico RAC02.....	62
Figura 33 Registro acelerográfico RAC03.....	63
Figura 34 Registro acelerográfico RAC04.....	63
Figura 35 Registro acelerográfico RAC06.....	64
Figura 36 Registro acelerográfico RAC08.....	64
Figura 37 Registro acelerográfico RAC10.....	65
Figura 38 Registro acelerográfico RAC11.....	65

Figura 39 Mapa de localización de los perfiles estratigráficos y estaciones seleccionadas (MSZCali, 2005).....	67
Figura 40 Perfil estratigráfico Velódromo	68
Figura 41 Perfil estratigráfico Canchas Panamericanas.....	69
Figura 42 Perfil estratigráfico INGEOMINAS.....	70
Figura 43 Perfil estratigráfico Pasoancho con Carrera 80	71
Figura 44 Perfil estratigráfico Meléndez.....	72
Figura 45 Perfil estratigráfico Guadalupe	73
Figura 46 Perfil estratigráfico Navarro.....	74
Figura 47 Perfil estratigráfico Floralia.....	75
Figura 48 Espectro de respuesta Velódromo	80
Figura 49 Relación Espectral Velódromo	80
Figura 50 EUA en Superficie Velódromo	81
Figura 51 Espectro de respuesta INGEOMINAS.....	81
Figura 52 Relación Espectral INGEOMINAS	82
Figura 53 EUA en Superficie INGEOMINAS	82
Figura 54 Espectro de respuesta Pasoancho con Cr.80	83
Figura 55 Relación Espectral Pasoancho con Cr.80	83
Figura 56 EUA en Superficie Pasoancho con Cr.80.....	84
Figura 57 Espectro de respuesta Meléndez.....	84
Figura 58 Relación Espectral Meléndez.....	85
Figura 59 EUA en Superficie Meléndez	85

Figura 60 Espectro de respuesta Navarro	86
Figura 61 Relación Espectral Navarro	86
Figura 62 EUA en Superficie Navarro	87

1. INTRODUCCIÓN

Las características geotécnicas del suelo son de gran interés en la actualidad para el diseño y construcción de edificaciones debido a su influencia en el comportamiento de las estructuras cuando ocurre un evento sísmico (Ojeda, 1999). Un parámetro importante, es la profundidad del suelo, porque dependiendo de esta se obtendrán resultados más precisos de su estratigrafía, sin embargo, la profundidad hasta la cual se conocen las características geotécnicas del suelo de un lugar de interés puede estar asociada a los costos de los ensayos (Pinilla, 2012).

Los sismos de Haití (2010), Chile (2010) y Ecuador (2016) han sido devastadores al ocasionar grandes pérdidas humanas y materiales, lo que ha causado preocupación en el sector del diseño y construcción de edificaciones de países con amenaza sísmica alta. Se genera entonces el cuestionamiento de la metodología planteada en las diferentes normas, entre ellas el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10), al basar su predicción del movimiento del terreno originado por un sismo en la clasificación del perfil del suelo, siendo el parámetro más utilizado actualmente \overline{Vs}_{30} el cual es el promedio de la velocidad de ondas de cortante en los primeros 30 m de profundidad, y se resta atención a los posibles efectos que se pueden presentar si se analizan otras profundidades, igualmente si es necesario más de un parámetro para realizar una buena estimación de la predicción del movimiento del terreno como lo demuestra la investigación de Godoy et al. (2015).

Lo anteriormente descrito fue la motivación de la presente investigación, que evalúa la influencia de la profundidad del suelo en su respuesta sísmica, mediante una función de correlación basada en la Intensidad de Arias IA, un parámetro que podría ser utilizado para mejorar el sistema de clasificación actual. La evaluación se realizó con diferentes perfiles estratigráficos ubicados en Santiago de Cali y al utilizar el método lineal equivalente para determinar si la profundidad de 30 m superiores y el factor de \overline{Vs}_{30} son adecuados y suficientes para modelar la respuesta en superficie. Finalmente, se complementó al comparar los espectros de diseño propuestos por la NSR-10, MZSCali y el espectro determinado por el presente proyecto en la profundidad en la cual se obtiene la mejor correlación de acuerdo a la ubicación del perfil.

1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

La respuesta dinámica del suelo incide directamente en las solicitaciones y comportamiento de las edificaciones ante un sismo, por lo tanto, para diseñar una

obra correctamente en países con amenaza sísmica alta o intermedia, como es el caso de Colombia, es importante estimar los efectos de amplificación sísmica producidos por los estratos de suelo que componen el perfil estratigráfico (Centro de Estudios sobre Desastres y Riesgos, 2005). Para determinar la respuesta dinámica del suelo durante un sismo es importante realizar la clasificación del suelo y conocer la influencia de algunas de sus propiedades, tales como la velocidad de onda de corte V_s , el espesor, el amortiguamiento y la densidad de cada capa de suelo (Bermúdez et al, 2009).

Estudios realizados en Estados Unidos, han demostrado que la velocidad de onda de corte de los 30 primeros metros de profundidad V_{s30} , es un parámetro adecuado para la clasificación del suelo, sin embargo, es muy importante destacar que si bien el V_{s30} ha demostrado relacionarse bien con la respuesta dinámica en California donde en general la velocidad de onda de corte aumenta con la profundidad, este no es el caso cuando hay cambios abruptos en los perfiles de velocidad de onda de corte (Dobry, 2010).

En Colombia para clasificar el suelo se determina el tipo de perfil de suelo de acuerdo a la NSR-10 que usa el parámetro de la velocidad media de la onda de cortante en los valores de los 30 metros superiores del suelo. Es fundamental conocer la estratigrafía del perfil del suelo, pues la construcción del espectro de diseño se realiza con base en este parámetro para la selección de los dos factores de amplificación por efectos de sitio, F_a y F_v , los cuales afectan la zona del espectro de periodos cortos y periodos intermedios, respectivamente.

Cuando ocurre un evento sísmico los factores significativos en la generación de daños en las estructuras y pérdidas humanas son la magnitud del sismo, la distancia respecto a la fuente y las características geotécnicas del perfil estratigráfico del suelo (Ojeda, 1999). Este último es importante porque podría influir en la escala de daños, el movimiento en la superficie del terreno en un sitio puede diferir radicalmente del movimiento en la roca base, en especial si está compuesto por suelos inestables o blandos, que pueden causar deslizamientos o problemas de licuación (Chávez-García et al, 2014). En el momento que se propaga la onda sísmica por diferentes suelos se altera impactando en su forma y sus características, y genera mayores amplitudes del movimiento si es un suelo blando. Lo ideal sería conocer el perfil estratigráfico hasta la roca, entre más profundo se pueda llegar se tendrá en detalle los tipos de suelo que lo conforman y las alteraciones que estos pueden generar en la onda, así como sus efectos en superficie (Grajales, 2003).

En algunos casos es difícil tener el perfil estratigráfico hasta la roca debido a los altos costos asociados en la realización del ensayo a grandes profundidades, como en los ensayos downhole y crosshole que requieren de uno o más sondeos, igualmente existen ensayos no invasivos como Spectral Analysis of Surface Waves (SASW), Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW) y Refracción

por Microtremores (ReMi), estos ensayos tienen la ventaja de no necesitar sondeos, pero no logran medir la velocidad de un estrato blando que se encuentra bajo un estrato más rígido (Milsom, 2003).

Por otro lado, se han encontrado mejores resultados en la respuesta sísmica en profundidades más superficiales a los 30 metros, como en la investigación de Montalva et al. (2011), en la que se observó que para estructuras con altas frecuencias es el promedio de los cinco metros superficiales V_{s5} que resulta el mejor predictor de la amplificación, logrando que los costos en ensayos para obtener las propiedades del suelo sean menores y más acordes para el diseño.

1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿Cómo influye la profundidad hasta la cual se determinan las propiedades geotécnicas del estrato de suelo en su respuesta sísmica?

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo General

Evaluar la influencia de la profundidad hasta la cual se determinan las propiedades geotécnicas de los perfiles estratigráficos seleccionados de la microzonificación sísmica de Cali en su respuesta sísmica.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Modelar analíticamente en una dimensión los perfiles de suelo de la microzonificación sísmica de Cali mediante el uso del método lineal equivalente.
- Obtener la respuesta sísmica al utilizar diferentes profundidades en los perfiles de suelo seleccionados de la microzonificación sísmica de Cali.
- Analizar la sensibilidad de la respuesta sísmica de los perfiles estratigráficos en las profundidades establecidas.
- Comparar los espectros de diseño de los perfiles de suelo en la profundidad seleccionada según el criterio establecido de la función de correlación con los propuestos por la NSR-10 y la Microzonificación Sísmica de Cali.

1.4 JUSTIFICACIÓN

Uno de los factores más influyentes en la distribución de daños y pérdidas humanas durante los sismos son los efectos de sitio, pues determinan el comportamiento dinámico de los suelos y su respuesta cuando están sometidos a

sismos, por tal razón es importante su estudio en el análisis dinámico del perfil estratigráfico y en la realización de los proyectos de microzonificación (Bermúdez et al, 2002).

En los proyectos de microzonificación sísmica se ha encontrado que el efecto de sitio es el aspecto primordial en un evento sísmico, pues el comportamiento del suelo de toda una ciudad no será homogéneo, un ejemplo de esto fue el caso de la ciudad de Armenia, donde el sismo del 25 de Enero de 1999 ($M_w=6.2$) ocasionó muchos daños en las edificaciones, sin embargo, se observó que se concentraron en sectores específicos y en algunas edificaciones eran evidentes los efectos de amplificación local (Bermúdez et al, 2001).

Figura 1 Armenia 25 de Enero de 1999 (www.elpais.com.co)



La ciudad de Santiago de Cali está ubicada en una zona de alta actividad sísmica, por lo tanto, es de vital importancia el estudio de los efectos de sitio porque puede mejorar la planeación de su desarrollo teniendo en cuenta las restricciones a los tipos de construcción y los parámetros de diseño para las diferentes zonas de la ciudad, así como determinar posibles escenarios de daños durante futuros sismos esperados (SGC y Universidad de los Andes, 1997).

Al definir un valor del V_{s30} para el sitio de interés, y modificar el espectro de diseño en roca para esa velocidad, se incluyen las modificaciones esperadas en el movimiento sísmico en ese sitio debido a la amplificación del movimiento, causada por la heterogeneidad de los estratos superficiales, sin embargo, esta metodología

puede generar que al solo basarse en la norma para el diseño y construcción se pierda la complejidad del estudio de los efectos de sitio que frecuentemente aparecen (Chávez-García et al., 2014).

Por otro lado, en los estudios de microzonificación se requiere generalizar unas determinadas condiciones de suelo para un área considerable, lo que causa la posibilidad de que sitios con ligeras diferencias en sus propiedades del suelo generen demandas significativamente diferentes en cuanto a los requisitos de construcción, produciendo efectos en la seguridad y economía del proyecto (Montalva et al., 2011).

2. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presentan las bases teóricas que fundamentan el presente proyecto, se encuentran los conceptos de los principales parámetros, la metodología utilizada y un resumen general del capítulo de la NSR-10 referente a la selección del tipo de perfil de suelo, que se utiliza para obtener el espectro de diseño de acuerdo a la ubicación del sitio de interés.

2.1. INTENSIDAD DE ARIAS

La intensidad de Arias es una medida de la energía del terremoto, representa la capacidad de producir daño de un terremoto específico mediante un valor escalar y se define según la integral siguiente:

$$IA = \frac{\pi}{2g} \int_0^t a^2(t) dt$$

Donde $a(t)$ son los valores de la aceleración registrada durante el sismo, t el tiempo total del registro y g la gravedad (Arias, 1969).

La Intensidad de Arias es una medida objetiva que determina el daño causado por un terremoto (Rodríguez, 2009) debido a que tiene la función de representar variables como la amplitud, el contenido frecuencial y la duración del registro sísmico, además permite determinar el riesgo sísmico de un área y conocer los daños que un sismo puede provocar en las estructuras (Rodríguez, 2009), puesto que las escalas de Mercalli Modificada y la Escala Macrosísmica Europea son parámetros muy subjetivos que no se miden instrumentalmente y dependen de la percepción de las personas y las evidencias de los daños causados por un evento sísmico (Schmidt, 2008).

Salcedo et al. (2009) coinciden en que la IA es la medida instrumental de mayor confiabilidad utilizada a la fecha por los ingenieros cuando diseñan obras, ya que facilita prever la reacción de un suelo determinado ante la energía sísmica y determina el patrón de amplificación o de atenuación de las ondas sísmicas que viajan por el interior de la tierra (Rodríguez, 2009).

2.2. VELOCIDAD DE LA ONDA DE CORTANTE (V_s)

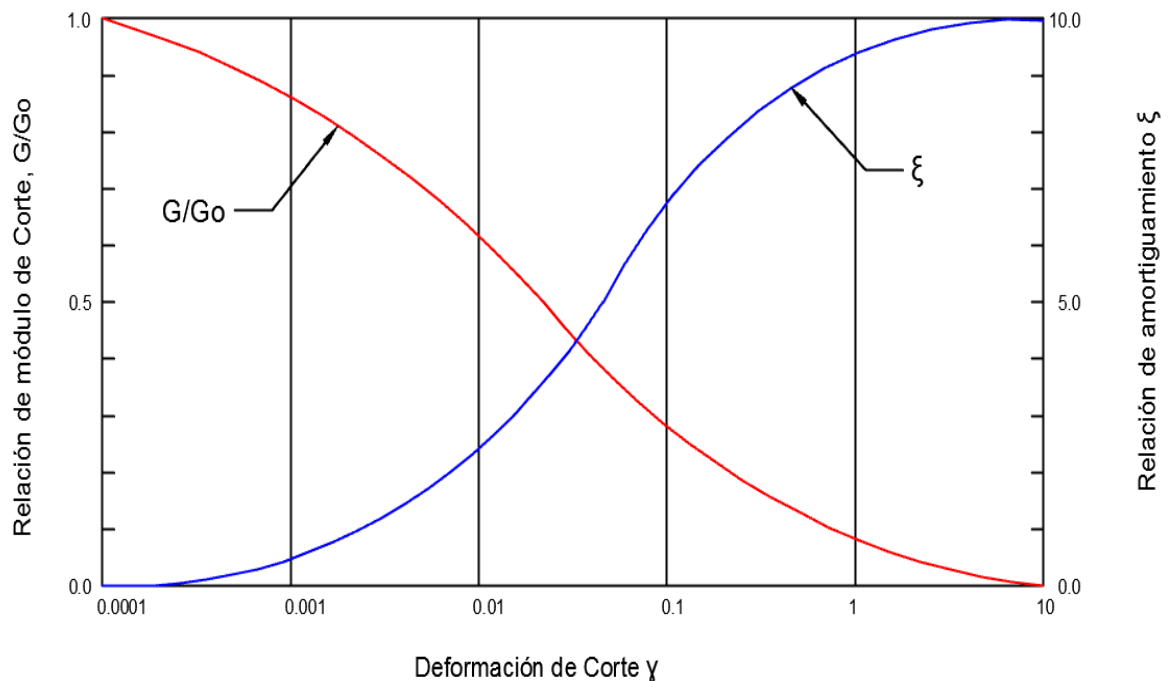
La rigidez máxima de un suelo está relacionada con su velocidad de onda de corte (Kramer, 1996). La determinación de la velocidad de propagación de las ondas de

corte (V_s) es de gran utilidad en la geotecnia, ya que con este valor se puede determinar algunos parámetros como el módulo de rigidez cortante (G), inferir densidad en campo y estimar el estado de esfuerzos. Dado que las deformaciones causadas por las pruebas geofísicas son muy pequeñas, el módulo cortante calculado con valores de V_s obtenido de dichas pruebas corresponde al valor máximo (G_0); el cual sufre una degradación dependiendo de las características geotécnicas del suelo y de la deformación inducida. Este tipo de comportamiento se conoce como elástico no-lineal y está asociado con la variación de las propiedades mecánicas de suelos y rocas blandas ante sollicitaciones sucesivas de carga y descarga (Aponte, 2011).

2.3. CURVAS DE DEGRADACIÓN

Las curvas de degradación del módulo de corte y amortiguamiento se construyen a partir de ensayos dinámicos de laboratorio tales como columna resonante, triaxial cíclico, bender element y otros (García et al., 2015). Para establecer el comportamiento dinámico de los suelos bajo cargas dinámicas es importante conocer las características de las curvas esfuerzo-deformación y específicamente con: resistencia al corte en términos de tasas de deformación, los módulos de Young E , los módulos de corte G , para cargas dinámicas y amortiguamiento ξ (MZSCali, 2005).

Figura 2 Curva de degradación del módulo de corte y amortiguamiento (MZSCali, 2005)



2.4. EFECTOS DE SITIO

La transformación que sufren las ondas sísmicas desde la roca hasta la superficie se le conoce como efecto de sitio, este puede influir de distintas maneras según las condiciones geológicas en la respuesta sísmica del suelo al ocurrir un sismo (Grajales, 2003). Las ondas sísmicas una vez emitidas por la fuente dependen fundamentalmente de las propiedades de los medios en que se propagan y la falta de homogeneidad que encuentra en su trayecto (Grajales, 2003).

Los efectos de las formaciones geológicas sobre los movimientos sísmicos existen y pueden ser muy grandes, dos ejemplos de tales efectos son:

- El área de San Francisco, California, en la que las amplificaciones sobre sedimentos no consolidados han sido responsables de variaciones de intensidad de hasta dos grados en escala MM, durante los terremotos de San Francisco de 1906, Loma Prieta de 1989 y Northridge en 1994.
- El valle de la ciudad de México, donde los depósitos de arcilla lacustre indujeron fenómenos de amplificación que provocaron pérdidas de vidas humanas y económicas durante el terremoto de 1985 (Grajales, 2003).

2.5. FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA

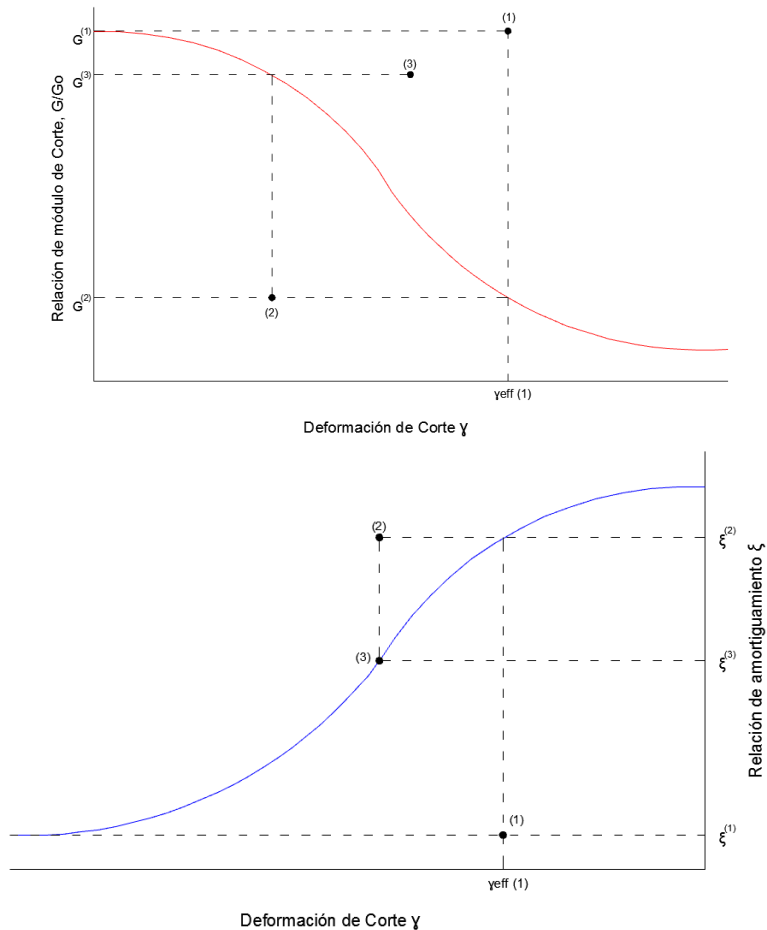
Una importante técnica de análisis de la respuesta del suelo se basa en el uso de las funciones de transferencia. Para el problema de respuesta del terreno, las funciones de transferencia pueden ser utilizadas para expresar diversos parámetros de respuesta, tales como el desplazamiento, la velocidad y la aceleración, a un movimiento de entrada como la aceleración en roca. Este enfoque se basa en el análisis de sistemas lineales. Aunque el cálculo implica la manipulación de los números complejos, el enfoque en sí es bastante simple. El registro de movimiento en roca (entrada) se representa como una serie de Fourier, por lo general mediante la FFT (Transformada rápida de Fourier). Cada término en la serie de Fourier en roca (entrada) se multiplica por la función de transferencia (sistema) para producir la serie de Fourier del movimiento de la superficie del suelo (salida). El movimiento de la superficie del suelo (salida) puede entonces ser expresada en el dominio del tiempo usando la FFT inversa. Así, la función de transferencia determina cómo se amplifica cada frecuencia desde la roca al depósito del suelo (Kramer, 1996).

2.6. ANÁLISIS LINEAL EQUIVALENTE

Dado que la no linealidad del comportamiento del suelo es bien conocido, el enfoque lineal debe ser modificado para proporcionar estimaciones razonables de respuesta del terreno para los problemas prácticos de interés. El comportamiento no lineal se puede aproximar por las propiedades del suelo lineales equivalentes

(Kramer, 1996). Las propiedades esfuerzo-deformación, son definidas por un par de curvas que representan la degradación del módulo de corte secante y la variación del amortiguamiento con la deformación como se muestra en la figura 3 (MZSCali, 2005).

Figura 3 Análisis lineal equivalente (Kramer, 1996)



El enfoque lineal requiere que G y ξ sean constantes para cada capa de suelo, por lo tanto, el problema se convierte en uno de determinación de los valores que son coherentes con el nivel inducido de esfuerzo en cada capa. Para hacer frente a este problema se necesita una definición objetiva del nivel de esfuerzo. Para caracterizar el nivel de esfuerzo del registro transitorio en términos de una deformación por esfuerzo cortante efectiva se puede variar entre aproximadamente 50 y 70% de la tensión máxima de corte. La respuesta calculada no es particularmente sensible a este porcentaje, sin embargo, la deformación por esfuerzo cortante efectiva a menudo se toma como 65% de la deformación máxima (Kramer, 1996).

Dado que el nivel de deformación calculado depende de los valores de las propiedades lineales equivalentes, se requiere un procedimiento iterativo para garantizar que las propiedades que se utilizan en el análisis sean compatibles con los niveles de deformación en todas las capas. A pesar de que el proceso de iteración hacia las propiedades del suelo permite un comportamiento no lineal del suelo, es importante recordar que el método es todavía un método lineal de análisis y es incapaz de representar los cambios en la rigidez del suelo que se producen en realidad durante el sismo (Kramer, 1996).

2.7. NORMA COLOMBIANA SISMO RESISTENTE

La Norma Colombiana Sismo Resistente (NSR-10) en el capítulo A.2.4 - Efectos locales, indica los tipos de perfil de suelo y los valores de los coeficientes de sitio. Señala dos factores de amplificación del espectro por efectos de sitio, F_a y F_v , los cuales afectan la zona del espectro de periodos cortos y periodos intermedios, respectivamente. Los efectos locales de la respuesta sísmica de la edificación deben evaluarse con base a los perfiles de suelos dados a continuación:

Tabla 1 Clasificación de los perfiles de suelo (NSR-10, Tabla A.2.4-1)

Tipo de perfil	Descripción	Definición
A	Perfil de roca competente	$\bar{V}_s \geq 1500 \text{ m/s}$
B	Perfil de roca de rigidez media	$1500 \text{ m/s} \geq \bar{V}_s \geq 760 \text{ m/s}$
C	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	$760 \text{ m/s} \geq \bar{V}_s \geq 360 \text{ m/s}$
	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con cualquiera de los dos criterios	$\bar{N} \geq 50$, o $\bar{s}_u \geq 100 \text{ kPa} (\approx 1 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2})$
D	Perfiles de suelos rígidos que cumplan con el criterio de velocidad de onda de cortante, o	$360 \text{ m/s} \geq \bar{V}_s \geq 180 \text{ m/s}$
	Perfiles de suelos rígidos que cumplan con cualquiera de las dos condiciones	$50 \geq \bar{N} \geq 15$, o $100 \text{ kPa} (\approx 1 \text{ kf/cm}^2) > \bar{s}_u \geq 50 \text{ kPa} (\approx 0.5 \text{ kf/cm}^2)$

E	Perfiles que cumplan con el criterio de velocidad de onda de cortante, o	$180 \text{ m/s} > \overline{V_s}$
	Perfil que contiene un espesor total H mayor de 3 m de arcillas blandas	$IP > 20$ $w \geq 40\%$ $50 \text{ kPa } (\approx 0.5 \text{ kg/cm}^2) > \overline{s_u}$
F	Los perfiles de suelo tipo F requieren una evaluación realizada explícitamente en el sitio por un ingeniero geotecnista de acuerdo con el procedimiento de A.2.10. Se contemplan las siguientes subclases: F1 – Suelos susceptibles a la falla o colapso causado por la excitación sísmica, tales como: suelos licuables, arcillas sensitivas, suelos dispersivos o débilmente cementados, etc. F2 – Turba y arcillas orgánicas y muy orgánicas (H>3m para turba o arcillas orgánicas y muy orgánicas). F3 – Arcillas de muy alta plasticidad (H>7.5m con índice de plasticidad IP>75) F4 – Perfiles de gran espesor de arcillas de rigidez mediana a blanda (H>36m)	

Uno de los parámetros para definir el tipo de perfil de suelo es la velocidad media de la onda de cortante que se obtiene por medio de:

$$\frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{V_{si}}}$$

d_i = espesor del estrato i, localizado dentro de los 30 metros superiores del perfil.

V_{si} = velocidad media de la onda de cortante del suelo del estrato i, medida en campo, en m/s

$\sum_{i=1}^n d_i = 30$ metros siempre

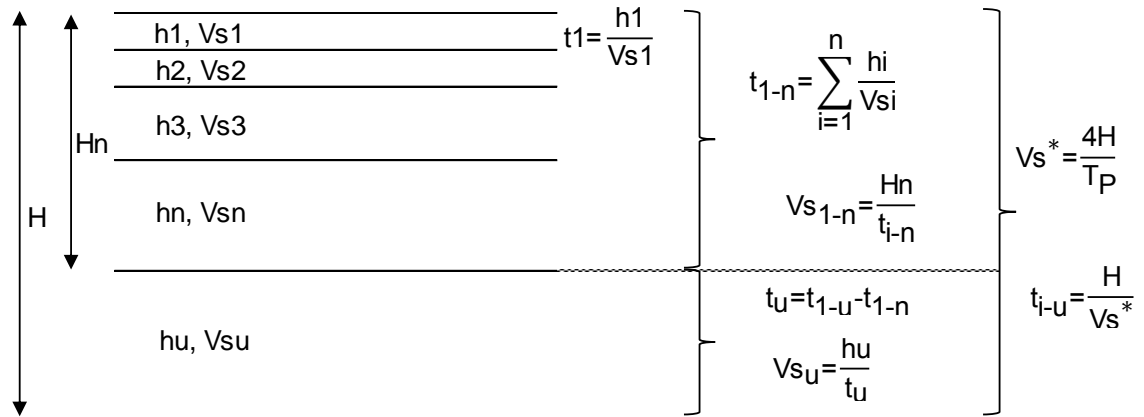
2.8. MODELO DE BASAMENTO SÍSMICO

El modelo de basamento sísmico determina la profundidad hasta la cual el periodo fundamental del depósito es aproximadamente igual al reportado en el mapa de isoperiodos de la MZSCali (Informe 5.1, Proyecto MZSCali, 2005). En la figura 4 se ilustra el procedimiento de cálculo para obtener la velocidad y espesor de la última capa (V_{su} y h_u) con la cual el periodo del depósito es igual al periodo elástico o fundamental para bajas deformaciones (T_p).

En la MZSCali los valores de la velocidad de onda de corte de las últimas capas y de la base, obedecen al proceso de calibración de los modelos, en donde se variaban consistentemente para obtener la mejor respuesta en superficie. Tales

modelos se evaluaron mediante el software PROSHAKE en todos los sitios seleccionados, cuyas profundidades variaron entre 20 y 50 m en zonas de Flujos y Cerros, de 80 a 160 m en la zona de Abanicos y de 200 m en la zona de Llanura Aluvial.

Figura 4 Esquema del proceso de determinación del basamento sísmico (MZSCali, 2005).



Siendo:

H : Espesor total del perfil

V_{s*} : Velocidad de onda de corte del perfil

h_u : Espesor de la última capa del perfil que antecede a la roca

V_{su} : Velocidad de la onda de corte de la última capa del perfil que antecede a la roca

t_u : Periodo de la última capa del perfil que antecede a la roca

H_n : Espesor del perfil hasta donde se conocen sus propiedades por medio del ensayo de down hole

t_{1-u} : Periodo de la capa 1 hasta la u

t_{1-n} : Periodo de la capa 1 hasta la n

V_{s1-n} : Velocidad de onda de corte de la capa 1 hasta la n

h_i : Espesor de cada capa

V_{si} : Velocidad de onda de corte de cada capa

3. ANTECEDENTES

En este capítulo se exponen las investigaciones que se consideran tienen relación o similitud con el presente proyecto, se enuncian en orden ascendente según su fecha de realización.

EFFECTOS DE PEQUEÑOS CAMBIOS EN UN DEPÓSITO DE SUELO SOBRE SUS CARACTERÍSTICAS DE RESPUESTA SÍSMICA

Vergnaud (1973) investigó la sensibilidad de la respuesta sísmica de un depósito de suelo al introducir pequeños cambios en la profundidad de la roca, el espesor de los estratos y la rigidez de los estratos. La metodología que empleó fue tomar como referencia dos depósitos de suelo y tres acelerogramas de entrada, los cuales se seleccionaron de acuerdo a las condiciones sísmicas de Bogotá. Para el primer depósito con una profundidad total de 25 metros, se realizó el análisis de respuesta dinámica, considerando 23 variaciones, y para el segundo depósito con 60 metros, se consideraron 26 variaciones. Las variaciones realizadas consisten en cambios de profundidad de la roca (modificando espesores de estratos blandos y duros, manteniendo la profundidad total constante) y cambios en el valor de la resistencia a la Penetración Estándar (N) de estratos blandos y duros, Vergnaud (1973) consideró analizar los efectos de estos cambios sobre los espectros de respuesta debido a que muestran características dinámicas de los movimientos resultantes en la superficie.

Finalmente, Vergnaud (1973) concluyó que se requiere una determinación precisa de la profundidad de la roca y del espesor y rigidez de estratos blandos, para poder obtener espectros de respuesta representativos de un depósito de suelo. La rigidez de los estratos blandos tiende a perder influencia al aumentar la profundidad total del depósito; la posición de la roca parece ser muy importante cuando se consideran depósitos de suelo poco profundo, o, en depósitos profundos, cuando el espesor de un estrato blando determina dicha posición. Además, que la onda de entrada puede ser también un factor importante en la sensibilidad de la respuesta; para dos acelerogramas de entrada diferentes, se pueden observar diferentes efectos al considerar iguales modificaciones en un depósito de suelo.

ESTIMATES OF SITE-DEPENDENT RESPONSE SPECTRA FOR DESIGN (METHODOLOGY AND JUSTIFICATION) (ESTIMACIONES DE ESPECTRO DE RESPUESTA DEPENDIENDO DEL SITIO PARA EL DISEÑO (JUSTIFICACIÓN Y METODOLOGÍA))

Borcherdt (1994) proporcionó una metodología general que consiste simplemente en cuatro pasos para el desarrollo de las estimaciones de espectros de respuesta dependiendo del sitio. Este análisis establece importantes correlaciones entre la respuesta sísmica, las propiedades físicas del suelo y la velocidad media de la

onda de corte, que ofrecen una mejora de las definiciones de clases de sitio para utilizar en el diseño sismo-resistente. Los pasos planteados son: 1) Determinación de los niveles espectrales de entrada del movimiento del suelo, Ia y Iv, para periodo corto y medio. 2) Caracterizar las condiciones locales en términos de la velocidad media de onda de corte a una profundidad de 30 metros. 3) A partir de los datos obtenidos del paso 1 y 2 deducir los factores de amplificación de sitio, Fa y Fv. 4) Calcular el espectro de respuesta Sa dependiendo del sitio.

Un comentario de Borchardt sobre la clasificación del sitio de acuerdo a las propiedades físicas, es que las características de amplificación de los depósitos geológicos tienden a disminuir con la profundidad, en consecuencia una clasificación del sitio basado solo en los materiales cercanos a la superficie tenderá a estimar las características de amplificación. Esta clasificación está en función de la velocidad media de la onda de corte, por lo tanto es importante realizar una buena estimación. Una técnica es usar la información del espesor y las propiedades físicas de las capas subyacentes y la otra es la medición directa de la velocidad media de onda de corte utilizando los tiempos de viaje de ondas de corte a través de los 30 primeros metros del material (Borchardt, 1994).

Finalmente, en este trabajo se encontró una relación entre el promedio de la velocidad de onda de corte en los primeros 30 metros y la amplificación de sitio, de acuerdo con esto propuso modificar el espectro de respuesta en roca a otro en suelo con distintas rigideces, asociadas a V_{s30} . Este criterio se ha popularizado en los últimos años y lo utilizan diferentes códigos o reglamentos en varios países como Estados Unidos en donde se utiliza el Código Internacional para la construcción IBC 2006.

EMPIRICAL ATTENUATION RELATIONSHIP FOR ARIAS INTENSITY (RELACION DE ATENUACIÓN EMPIRICA PARA LA INTENSIDAD DE ARIAS)

Travasarou et al. (2003) consideró la IA es uno de los parámetros más usados para determinar la intensidad de un sismo y lo evidencian las investigaciones que han aportado correlaciones que permiten considerar la Intensidad de Arias como un indicador más confiable de la energía liberada de un sismo en un sitio específico, al demostrar que las ecuaciones presentan una gran estabilidad y un alto coeficiente de correlación con PGA. Además, a partir de este parámetro ha sido posible definir umbrales referentes al desempeño y al daño estructural, al potencial de licuefacción y a la estabilidad de taludes, entre otros.

ESTUDIO DE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE SANTIAGO DE CALI

La microzonificación sísmica para Cali consistió en establecer zonas de respuesta sísmica similar para definir en cada una parámetros, recomendaciones y condiciones para el diseño y construcción de edificaciones y obras civiles que dependen principalmente de las características de su respuesta de sitio y la evaluación de los efectos locales (MZSCali, 2005).

En el proyecto de Microzonificación Sísmica de Cali, para la evaluación de la respuesta sísmica local se realizaron estudios geológicos, geofísicos, geotécnicos y geométricos para definir las características de los perfiles y secciones geotécnicas para conocer el comportamiento dinámico de los suelos en la ocurrencia de un sismo. Inicialmente se calibraron los modelos de respuesta sísmica de acuerdo con los perfiles promedio geotécnicos del subsuelo y 15 sismos registrados de la red portátil de acelerógrafos de Cali (RPAC) y la red de acelerógrafos permanente de Cali (RAC), sin embargo, se utilizó la más representativa a nivel de amenaza sísmica para la ciudad, para lo que se seleccionó 8 sitios: Parque del Amor, Vivero, INGEOMINAS, Velódromo, Panamericanas, INEM, Mallarino y Navarro, utilizando la estación en suelo más cercana y como estación en roca CCAL6: Zoológico. Posteriormente, se seleccionaron 10 señales de acuerdo a las fuentes sismogénicas que presentan mayor contribución en la amenaza sísmica (MZSCali, 2005).

La calibración de los modelos se realizó para obtener la amplificación espectral y contenido frecuencial más parecida a la registrada en superficie, mediante dos tipos de análisis: modelo de basamento sísmico y modelo de basamento rocoso. Los resultados de la calibración presentan que los modelos simulados con DEEPSOIL se asemeja solo en algunos rangos a la respuesta, en cambio PROSHAKE se parecen para todo el rango espectral a excepción entre 0.2 a 0.3 s donde se obtuvo las mayores amplificaciones que se pueden deber al contenido de altas frecuencias de la señal de entrada en roca por un leve efecto de sitio que se manifiesta a periodos bajos únicamente (MZSCali, 2005).

COMPARISON BETWEEN V_{s30} AND OTHER ESTIMATES OF SITE AMPLIFICATION IN ITALY FIRST EUROPEAN CONFERENCE ON EARTHQUAKE ENGINEERING AND SEISMOLOGY (COMPARACIÓN ENTRE V_{s30} Y OTRAS ESTIMACIONES DE AMPLIFICACIÓN DE SITIOS EN ITALIA EN LA PRIMERA CONFERENCIA EUROPEA EN INGENIERIA SISMOLÓGICA Y DE TERREMOTOS)

Gallipoli y Mucciarelli (2006) realizaron en Italia una comparación entre el sitio de amplificación sísmica y V_{s30} , el cual demostró que este último parámetro no es un buen indicador de los efectos de sitio observados. La razón por la que en Italia V_{s30} no proporciona estimaciones satisfactorias, está vinculada a ambientes geológicos peculiares que se han generalizado en el país. Los principales problemas encontrados son subestimaciones por V_{s30} en sitios con inversiones de velocidad y sobreestimaciones en cuencas profundas. V_{s30} parece funcionar bien sólo si un sitio tiene un perfil de velocidad estrictamente monótona creciente con la profundidad.

AN OVERVIEW OF THE NGA PROJECT (UNA REVISIÓN DEL PROYECTO NGA)

El Centro de Investigación de Ingeniería de Terremotos del Pacífico (PEER) coordinó el proyecto Nueva generación de los modelos de atenuación de

movimiento del suelo (NGA), el cual consiste en la realización de nuevas relaciones para la predicción del movimiento del suelo para terremotos corticales superficiales en el oeste de Estados Unidos y regiones tectónicas activas similares. De esta investigación es importante destacar que todos los desarrolladores utilizaron la velocidad media de onda de corte en la parte superior de los 30 metros del perfil V_{s30} como parámetro para caracterizar la rigidez en los movimientos del suelo. Para las estaciones que no tenían medidos los valores de V_{s30} se estimó por medio de correlaciones. El uso de este parámetro se considera que es más de diagnóstico en la determinación de la amplificación de sitio que las amplias y ambiguas categorías de suelo y roca utilizadas en las relaciones pre-existentes.

POTENCIAL DESTRUCTIVO DE SISMOS (SEGUNDA PARTE)

Orosco et al. (2008) considera que la IA es un parámetro que representa mejor los daños que la intensidad Mercalli o PGA, y se han realizado investigaciones en las que se muestra una buena correlación con ambas. La intensidad de Arias corresponde con el área debajo del espectro de energía total absorbido por el sistema de un grado de libertad final de la excitación del suelo, cuantificando la energía liberada por un sismo.

CORRELACIONES A PARTIR DE LA INTENSIDAD DE ARIAS PARA DATOS ACELEROGRÁFICOS DE COSTA RICA

Schmidt et al. (2008) expone en su artículo que Arias propuso un indicador por medio del cual se obtiene una medida del contenido energético de un registro sísmico, basado en cada valor de aceleración registrado a lo largo del tiempo, y es conocido como la intensidad de Arias (IA) en su honor. La deducción de la expresión para la intensidad de Arias considera como modelo estructural el oscilador de un grado de libertad con amortiguamiento viscoso, al igual que la teoría de los espectros de respuesta. Por otro lado, se considera que un valor de IA mayor a 0.135 m/s es significativo para determinar posible daños a estructuras sometidas a acciones sísmicas, siendo los suelos blandos los que presentan un mayor valor de IA. A pesar de que los valores de la IA en las componentes horizontales son similares, algunos investigadores prefieren considerar el valor IA máximo o el vector cuadrático cuando cuentan con las estimaciones de IA derivadas de las dos componentes horizontales.

En este trabajo se plantea el uso de la intensidad de Arias como un indicador preciso de la fuerza del sismo y que puede ser correlacionado con otros parámetros, como la magnitud de momento (M_w), la distancia hipocentral (D) y la aceleración pico del suelo (PGA). Lo anterior lo propone debido a que la intensidad macrosísmica resulta ser un parámetro de difícil asignación y en especial para grados de intensidad VI o inferiores, y que no proviene de una medida instrumental, sino que se basa en la forma en que las personas perciben el movimiento en un sitio dado y a los daños a su alrededor. Por estas razones,

varios investigadores han propuesto indicadores de la fuerza con que un sismo afecta un sitio específico basándose en medidas instrumentales.

El autor pretende aportar correlaciones que permitan considerar la intensidad de arias como un indicador más confiable de la fuerza con que un sismo afecta un sitio específico, a partir de una selección detallada de datos y registros acelerográficos obtenidos en Costa Rica desde 1983 hasta el 2006. Los resultados obtenidos definen tres ecuaciones, la primera correlaciona I_A y PGA (utiliza ambas componentes) permitiendo calcular la I_A a partir del valor de PGA , la segunda correlación permite estimar la I_A máxima en un sitio específico, a partir de conocer la magnitud de momento (M_w), la distancia hipocentral (D) y el tipo de suelo (S), y por último la correlación, que permite calcular la IMM a partir del cálculo de I_A máxima.

EVALUACIÓN DEL PERFIL DE VELOCIDAD PARA ESTRATOS DE SUELO BLANDO POR MEDIO DE FUNCIONES DE TRANSFERENCIA

Bermúdez, Lozano y Ojeda (2009) proponen una metodología para la estimación del perfil de velocidades de onda de corte para estratos de suelos blandos a través del uso de la función de transferencia del suelo. Se utilizaron los registros acelerográficos de la estación de SGC Bogotá, la cual cuenta con acelerómetros en superficie y en profundidad a 180 m. El trabajo comienza con la evaluación de la función de transferencia (FT) para el registro del sismo de Quetame del 24 de mayo de 2008, una vez se evaluó la FT se procedió a realizar la inversión del perfil de velocidades, de esta manera se obtuvo el modelo de velocidad de mejor ajuste a la FT. Con el objeto de evaluar la efectividad de la metodología propuesta, se realizaron análisis comparativos de la respuesta del suelo al usar el nuevo perfil de velocidades obtenido a través de la inversión de la FT y con el modelo de velocidades establecido mediante ensayos geotécnicos para el estudio de Microzonificación Sísmica de Bogotá.

La metodología se aplicó para varios sismos que demuestran que los espectros a través de la inversión de la FFT son mejores y más cercanos a los registros reales que los perfiles estratigráficos obtenidos a partir de ensayos geotécnicos. Demuestra ser fácil y de rápida aplicación en zonas de alta sismicidad, ya que al utilizar solamente registros de movimientos débiles se puede evaluar los perfiles de suelos blandos. Este tipo de análisis sirve de apoyo en trabajos de microzonificación sísmica para las ciudades colombianas que lo requieren, ya que de una forma fácil y rápida se pueden conocer los parámetros dinámicos y así realizar el modelamiento de la respuesta sísmica del suelo, el cual nos permite identificar cómo se va a comportar el suelo de forma dinámica ante cualquier sismo que se registre en una determinada zona (Bermúdez et al., 2009).

PROPUESTA DE DEMANDA SÍSMICA CONTINUA PARA CÓDIGOS: ALEJÁNDONOS DE VS30

Montalva et al. (2011) realizaron una propuesta preliminar para utilizar distintos promedios de velocidad de onda de corte, no solamente V_{s30} en la modificación continua de un espectro para roca por efecto de respuesta de sitio. Las motivaciones para el cambio se debe a que la norma sísmica Chilena al igual que en la mayoría de los reglamentos del mundo incluyen el efecto de sitio realizando clasificación de sitios por sus propiedades dinámicas. Consideraron que la clasificación de sitio es anti-económica y sobrestima la demanda sísmica en la mitad de los sitios generando grandes costos en el diseño y construcción de las estructuras. Trabajaron sólo ocho sismos de mayor magnitud presentes en la base de datos de Kik-net que es un sitio web que proporciona los movimientos fuertes de redes sismográficas (Kiban-Kyoshin, 2011), debido al interés de caracterizar la respuesta de sitio durante eventos que puedan generar daño a las estructuras. La respuesta de sitio fue evaluada mediante la razón de respuesta espectral (RRS) para cada periodo (T) de cada registro. $RRS = S_{a, \text{superficie}}(T) / S_{a, \text{roca-basal}}(T)$. Los promedios de V_s usados fueron 5, 10, 15, 20, 25, 30, 50 y 100 metros, y para estructuras los periodos espectrales considerados fueron 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1, 1.5 y 2 segundos.

La correlación que encontraron entre V_s y RRS fue: a mayor V_s el perfil de suelo tendrá menor amplificación, igualmente observaron que para altas frecuencias los cinco metros superficiales, V_{s5} , resulta un mejor predictor de la amplificación y lo opuesto ocurre en bajas frecuencias, donde V_{s50} o incluso V_{s100} es mejor predictor, sin embargo, en promedio V_{s30} es un buen estimador de amplificación en el caso de usar solo un parámetro para todos los periodos espectrales.

Los autores proponen para calcular la respuesta de sitio inicialmente modificar un espectro en roca mediante ecuaciones para el factor de amplificación FA (V_{sx}), correspondiente a la mejor correlación para cada periodo T con su rango de validez de la V_s . Se concluyó que la metodología proporciona una alternativa a la clasificación sísmica utilizada por la mayor parte de las normas sísmicas mundiales. Además que los mejores predictores de la respuesta de sitio para estructuras con periodos de 0 a 0.2 es V_{s5} , de 0.3 a 0.4 es V_{s20} y los superiores a 0.5 segundos es V_{s50} , por lo tanto el método propuesto implica prospectar hasta mayores profundidades para estructuras de periodos largos. Sin embargo, en la opinión de los autores el hecho de que estas estructuras son en general bastante altas y por lo tanto el costo extra en investigaciones se compensaría con el mayor costo y rentabilidad de la estructura completa.

Investigadores como Cadet et al. (2009) y Boore (2004) han establecido la estrecha relación entre la rigidez de depósitos de suelo superficial con las de capas más profundas. Esto implica que conociendo las velocidades en los metros superficiales es posible estimar, las velocidades a profundidades mayores, y sumado al hecho que las longitudes de ondas varían con la frecuencia de dichas ondas, permite inferir que para frecuencias altas el promedio de velocidad de onda de corte que mejor estima la amplificación corresponderá a una profundidad

menor que para frecuencias bajas con mayor longitud de onda (Montalva et al., 2011).

PERFILES DE VELOCIDAD DE ONDA DE CORTE Y ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO SÍSMICO DEL SUELO EN EL PONIENTE DE GUADALAJARA

Salvador Lazcano (2012) realizó a partir de perfiles de velocidad de onda de corte contra profundidad en Guadalajara un análisis comparativo de comportamiento sísmico del suelo mediante tres metodologías: la clasificación de suelos según el IBC (2006), el análisis semi-empírico con PRODISIS que es un programa incluido en el Manual de Diseño por Sismo de la CFE (2008) que realiza diferentes funciones, entre ellas determina los parámetros de aceleraciones, velocidades y desplazamientos máximos en la roca para un sitio dado, y además se puede determinar el espectro para diseño sísmico para ese sitio y el análisis detallado con ProShake (1998) que es una variante del programa SHAKE, y es un método unidimensional lineal-equivalente, basado en un análisis que estima inicialmente un módulo de rigidez (G) y amortiguamiento (ξ) lineal-elástico que iterativamente varía en función de las deformaciones, el proceso se repite hasta que convergen suficientemente las propiedades calculadas con las utilizadas en el último ciclo.

Finalmente, Lazcano presenta una panorámica general de las condiciones del comportamiento sísmico del suelo de Guadalajara en la zona poniente, concluye que es conveniente revisar la metodología propuesta en el Manual de Diseño por Sismo de la CFE, puesto que al comparar arroja que los valores de PRODISS son entre el 64% y 70% de los resultados obtenidos con ProShake, así como los valores de periodos de vibración del suelo (T_s) se deben incrementar al menos 15% y los factores de amplificación entre la aceleración en la roca y en la superficie del suelo en al menos 20%. Por último resalta la importancia de impulsar la instrumentación sísmica en Guadalajara para calibrar los métodos analíticos contra la realidad.

IMPORTANCIA DE LA VELOCIDAD DE ONDA DE CORTE Y DEL PERÍODO PREDOMINANTE PARA LA EVALUACIÓN DE LA RESPUESTA DE SITIO EN SANTIAGO

La investigación realizada por Godoy et al. (2015) muestran la respuesta sísmica en diferentes sitios de Santiago de Chile al usar el método lineal equivalente, desarrollaron una metodología que les permitiera establecer perfiles equivalentes de V_s hasta el contraste de impedancia predominante o que la profundidad fuera mayor a 100 metros. Utilizaron mediciones superficiales de V_s , el periodo fundamental y mediante la técnica de Nakamura se calibró el periodo fundamental del suelo, la profundidad al basamento y la estratigrafía predominante de la zona. Una vez definidos los perfiles se comparó la respuesta modelada con la real. El motivo para llevar a cabo la investigación fue el terremoto del 27 de febrero del 2010 que ocasionó grandes daños, lo cual hizo reevaluar los aspectos de los

diseños de ingeniería y discutir sobre el sistema de clasificación sísmica de suelos de la normativa de diseño sísmico de estructuras.

Godoy et al. (2015) analizaron los parámetros que pueden influir en la respuesta de sitio y que podrían ser utilizados para mejorar el sistema de clasificación actual y determinar si el parámetro de la velocidad de onda de corte en los primeros 30 metros o V_{s30} es adecuado y suficiente para modelar la respuesta en superficie, de lo contrario complementarlo con el periodo fundamental del sitio para mejorar las predicciones. Igualmente, llevaron a cabo una verificación del método lineal equivalente mediante el coeficiente de Nash y Suttcliffe, concluyeron que es capaz de interpretar en gran parte de los casos de manera adecuada la respuesta en superficie, sin embargo, es importante contar con una buena caracterización del sitio y principalmente del V_s .

Finalmente, Godoy et al. (2015) realizaron un estudio paramétrico de respuesta de sitio al variar la profundidad y la estratigrafía de los perfiles seleccionados a través del método lineal equivalente para cada perfil e identificaron tendencias con distintos indicadores de la severidad de la respuesta como la aceleración espectral máxima, intensidad de Arias, factor de amplificación promedio. Los resultados indican la importancia de la incorporación de un parámetro que muestre las características dinámicas de todo el perfil para la clasificación sísmica de sitio como el periodo fundamental y no usar solamente los 30 metros superiores.

Actualmente el análisis sísmico en suelos se basa en los perfiles de velocidad media de onda de corte a los 30 m (V_{s30}) es un parámetro muy utilizado en la clasificación de los sitios para predecir su potencial para amplificar la excitación sísmica, así como las nuevas herramientas para análisis sismo-geotécnico como son los programas SHAKE, DEEPSOIL y muchos otros. Como se evidencia, en el estudio realizado por Salvador Lazcano (2012) depende del grado de complejidad y la importancia de un proyecto. Para analizar el comportamiento sísmico de depósitos de suelos se puede recurrir desde herramientas sencillas como son la clasificación de suelos de acuerdo a criterios o reglamentos como el IBC (2006) y el Eurocódigo 8 (2004), hasta métodos analíticos con diferentes grados de complejidad, siendo uno de los más populares el programa SHAKE y sus variantes.

En el presente proyecto se evalúa la influencia de la profundidad del suelo en la respuesta sísmica del suelo, mediante una función basada en la Intensidad de Arias y se realiza la variación de la profundidad de cada perfil mediante el modelo de basamento sísmico para controlar que sea constante el periodo fundamental, por último proponer para los perfiles seleccionados un espectro de diseño de acuerdo a los resultados obtenidos.

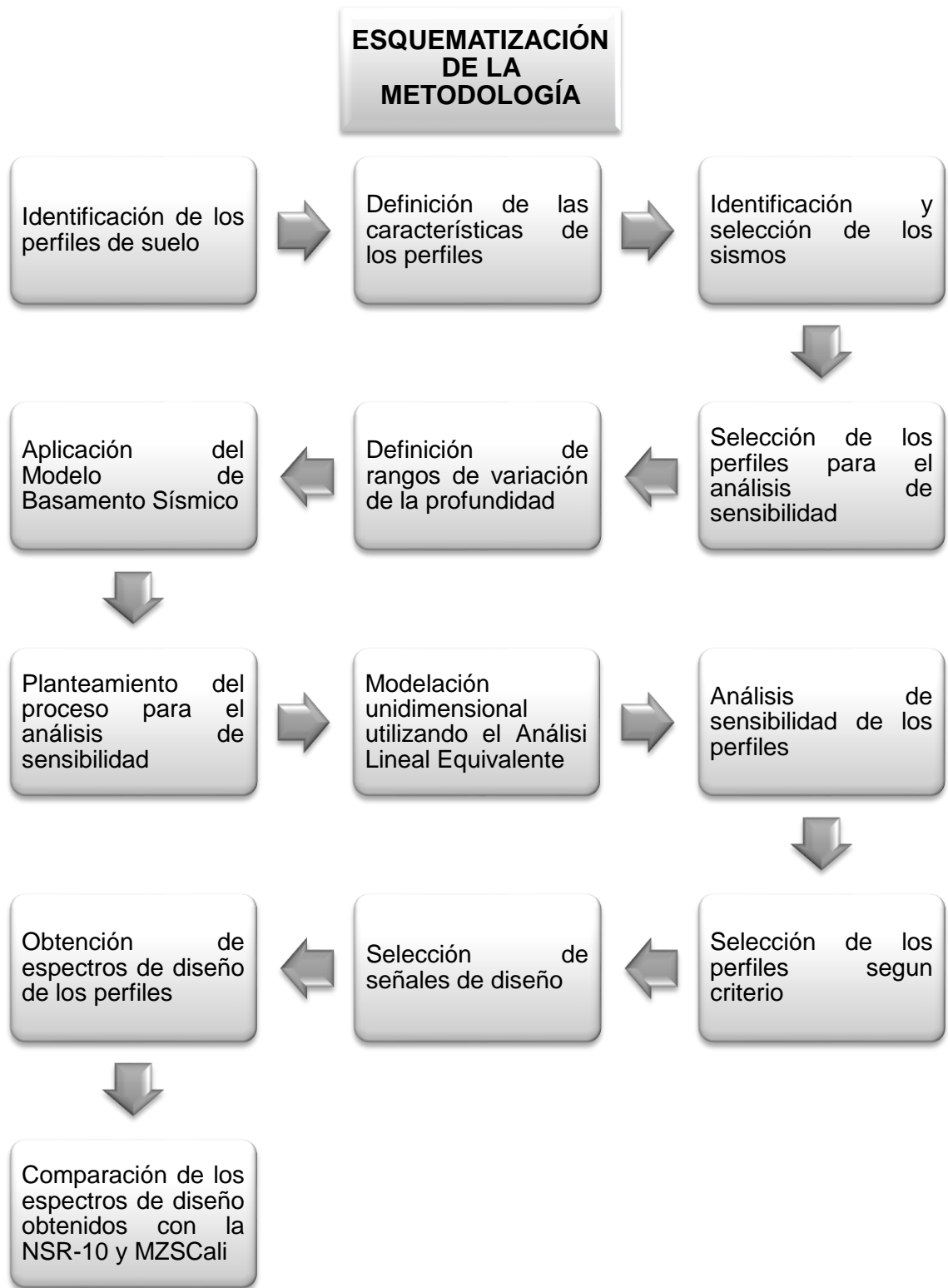
4. METODOLOGÍA

En este capítulo se muestra el procedimiento de la metodología planteada para el análisis de la influencia de la profundidad del suelo en su respuesta sísmica. Se llevó a cabo un total de ocho pasos que fueron separados por subcapítulos para definir: I) los perfiles estratigráficos, II) los sismos, III) el procedimiento para el análisis de la sensibilidad y IV) las consideraciones tenidas en cuenta en los modelos unidimensionales para la aplicación del método lineal equivalente.

A continuación se hace un breve resumen de cada subcapítulo esquematizado en la figura 5:

1. Identificación de los perfiles estratigráficos utilizados en el estudio de microzonificación sísmica de Cali.
2. Definición de las características geotécnicas de los perfiles estratigráficos a partir de los seleccionados de acuerdo a la realización del ensayo de down hole, debido a que solo estos contienen el valor de la velocidad de onda cortante en cada capa identificada en el perfil.
3. Identificación y selección de los sismos registrados por la Red Sismológica Nacional de Colombia (RSNC) de los acelerogramas ubicados en Cali y la Red de Acelerógrafos de Cali (RAC).
4. Selección de los perfiles estratigráficos de acuerdo a los pasos dos y tres, para realizar el análisis de sensibilidad de la respuesta sísmica al variar su profundidad.
5. Definición de los rangos al variar de profundidad para cada perfil estratigráfico según cada cambio de capa.
6. Aplicación de la metodología del modelo de basamento sísmico planteada en el estudio de la microzonificación sísmica de Cali, para determinar la profundidad hasta la cual el periodo fundamental del depósito es aproximadamente igual al reportado en el mapa de isoperiodos (Informe 5.1, MZSCali, 2005), el procedimiento ilustra el cálculo para obtener la velocidad y espesor de la última capa con la que el periodo del depósito es igual al periodo elástico o fundamental.
7. Procedimiento de análisis de sensibilidad basado en la función de correlación FO con el parámetro de la Intensidad de Arias IA, para comparar la respuesta dinámica experimental y la obtenida de cada uno de los perfiles estratigráficos, mediante el programa Efectos de Sitio, utilizando el análisis lineal equivalente.
8. Obtención de los espectros de diseño para cada perfil estratigráfico seleccionado, en la profundidad con mejor resultado según el análisis de sensibilidad; esto con el propósito de compararlos con los espectros de diseño de la NSR-10 y el estudio de microzonificación sísmica de Cali.

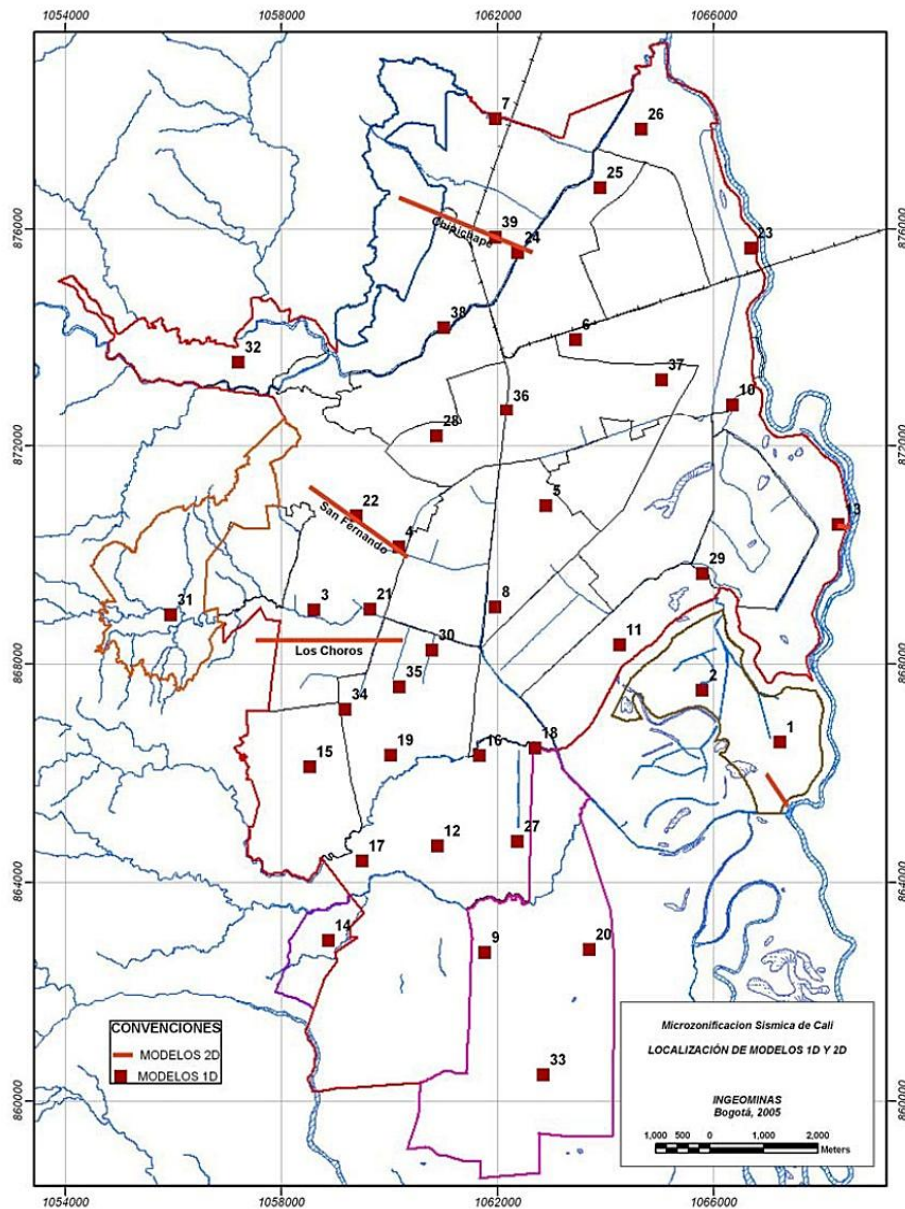
Figura 5 Esquema de la metodología



4.1. IDENTIFICACIÓN DE LOS PERFILES ESTRATIGRÁFICOS

A partir del Proyecto de Microzonificación Sísmica de Cali realizado en convenio entre SGC y DAGMA, se identificaron los perfiles estratigráficos promedio de los suelos usados para la modelación de la respuesta sísmica con la estación de la RAC más cercana, la zona geotécnica y la zona de respuesta sísmica. En la figura 6 se muestra la ubicación de los perfiles utilizados para el modelo de respuesta sísmica de la MZSCali (2005).

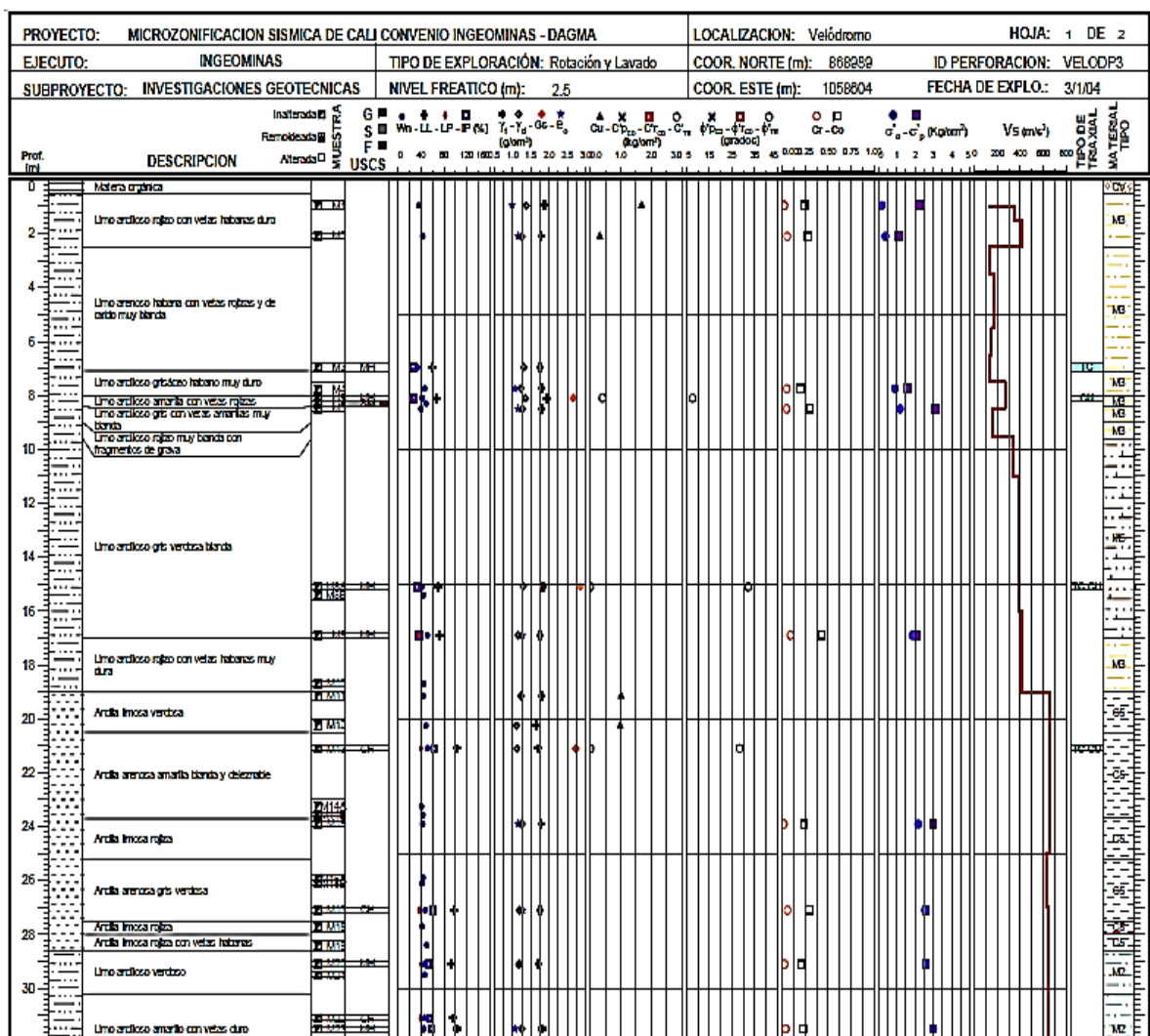
Figura 6 Localización de perfiles promedio para la modelación de la respuesta sísmica (MZSCali, 2005)



Sin embargo, de los 39 perfiles sólo se pueden seleccionar 18 debido a que estos fueron en los que se realizó el ensayo de down hole, por lo tanto, reportan el valor del Vs de cada estrato hasta donde se realizó y será la profundidad hasta la cual se pueden analizar los perfiles estratigráficos.

Se establecieron las propiedades geotécnicas (espesor, velocidad de onda de corte, densidad y material tipo) de cada capa del perfil de suelo de acuerdo al Anexo 4 Perfiles y secciones geotécnicas del informe 4 Geotecnia de la MZSCali (2005). La figura 7 muestra los resultados de cada perforación.

Figura 7 Perfil estratigráfico Velódromo P3 (MZSCali, 2005)



Para definir la curva de degradación de cada estrato de suelo del perfil, se realizó de acuerdo al material tipo, previamente establecido como se observa en la figura 7 y mediante las tablas 7, 8, 9 y 10 del anexo 1, que reportan los valores del

módulo G/Go y amortiguamiento en función de la deformación para materiales finos y granulares según el material tipo, mientras que para los valores de las gravas se utilizó los reportados por Rollins et al. (1998). Los valores de las curvas de degradación del módulo de corte y amortiguamiento establecidas por la MZSCali (2005) se determinaron para diferentes niveles de deformación y se realizó mediante los resultados de las pruebas triaxiales cíclicas.

4.2. SELECCIÓN DE LOS REGISTROS SÍSMICOS Y ESTACIONES

Inicialmente se realizó una búsqueda de los sismos registrados en Cali por la Red Portátil de Acelerógrafos de Cali (RPAC) y la Red de Acelerógrafos de Cali (RAC), mediante los boletines de movimientos fuertes reportados en la página web del Servicio Geológico Colombiano (SGC) de 1993 al 2012. En la tabla 2 se exponen los sismos identificados.

Tabla 2 Resumen de los sismos registrados en Cali

Sismo	Fecha	Profundidad (km)	Longitud (Grados)	Latitud (Grados)	Magnitud (MI)
Choco, Bajo Baudó	15/11/2004	26.2	-77.724	4.768	6.7
Valle del Cauca, Toro	08/03/2005	5	-76.084	4.572	5.2
Valle del Cauca, Calima	30/04/2006	59.5	-76.652	4.063	4.4

Para la selección de los sismos que se utilizaran para el análisis de sensibilidad, se realizó una validación del valor de la aceleración de la estación en roca, de acuerdo a la propuesta de Ojeda et al. (2004) de considerar a la estación La Reforma (RAC04) como estación de referencia (roca), ya que durante el sismo de Pizarro (Choco, Bajo Baudó) obtuvo aceleraciones inferiores a Bataclán (RAC07) que parece presentar efectos locales inducidos por algún estrato de suelo sobre roca, por lo tanto, en los tres sismos las aceleración registradas en RAC04 deben ser menores a las demás estaciones.

En las figuras 8, 9 y 10 se muestran las aceleraciones máximas en cada sismo identificado, según las estaciones donde se registró, y de acuerdo a estas figuras se observa que el valor de la aceleración en RAC4 en el sismo de Calima es la máxima, en Pizarro es la menor y en Toro es superior al de tres registros. Según los resultados obtenidos se concluye que el sismo para realizar la evaluación es el de Pizarro, puesto que en los registros acelerográficos de Calima y Toro no cumplen con la consideración de tener la menor aceleración en la estación en roca.

Figura 8 Aceleraciones del sismo de Pizarro

PIZARRO

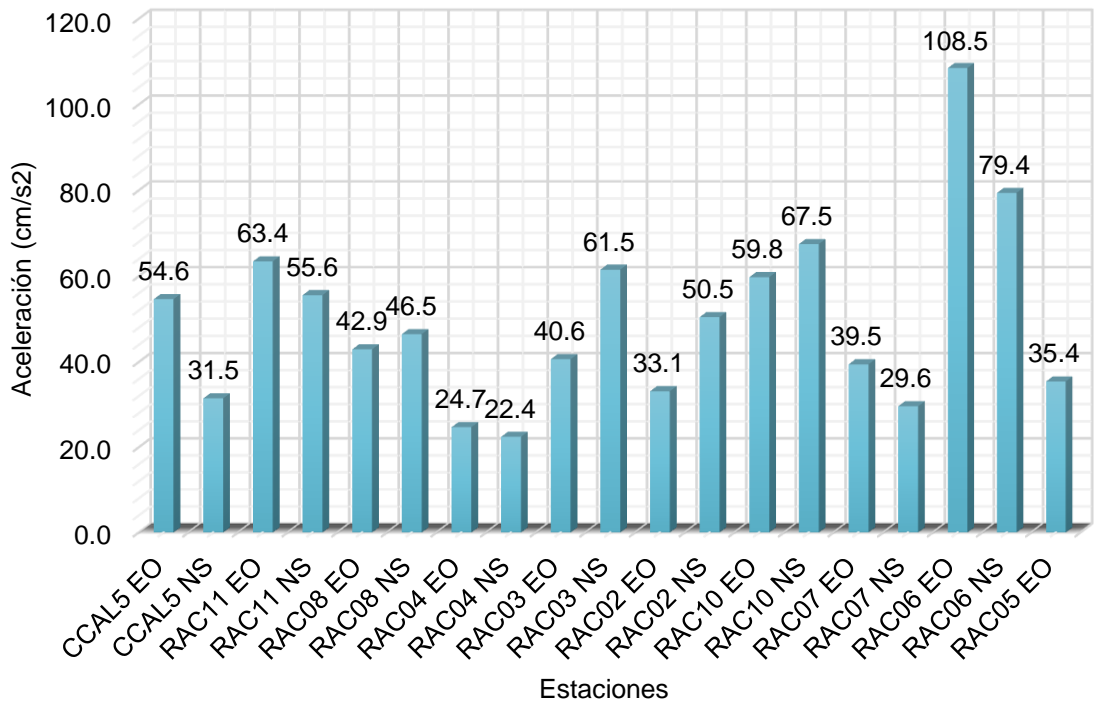


Figura 9 Aceleraciones del sismo de Toro

TORO

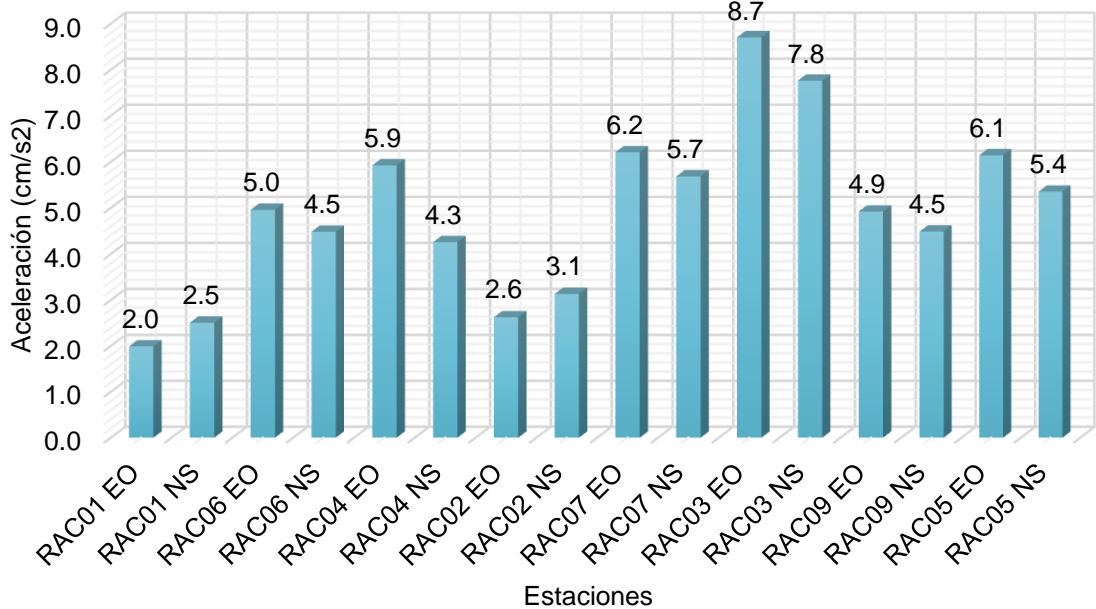
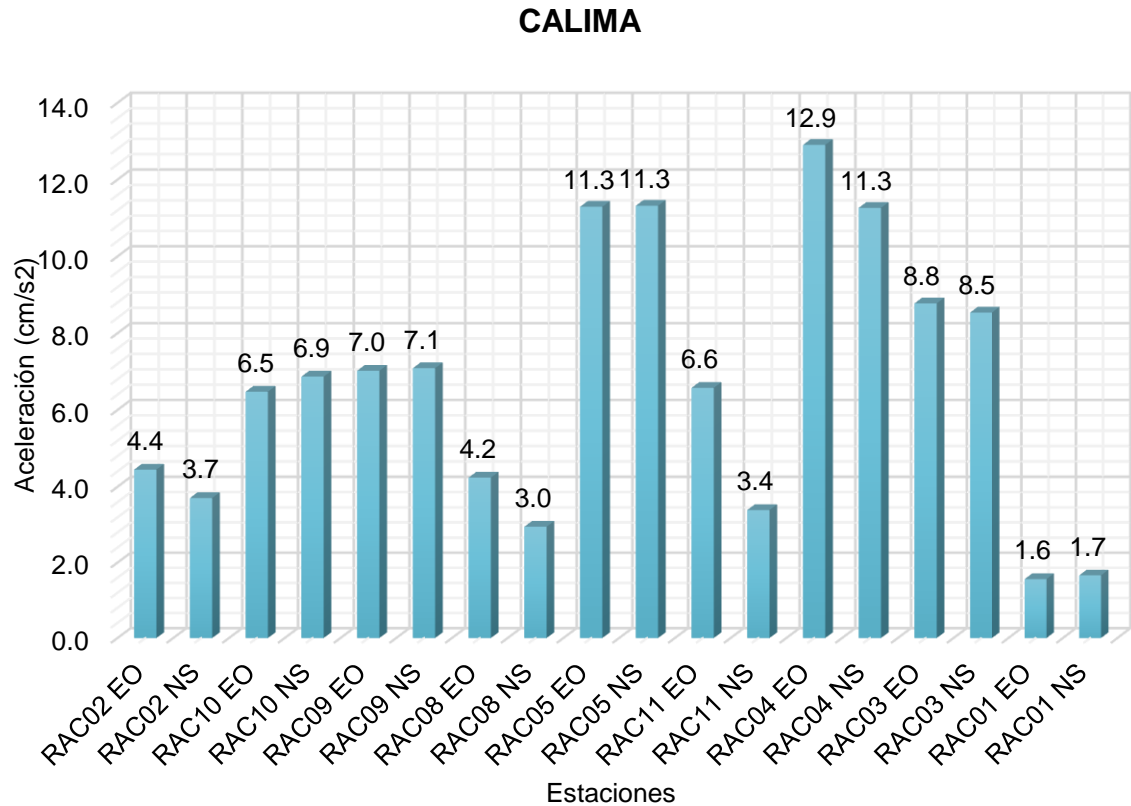


Figura 10 Aceleraciones del sismo de Calima



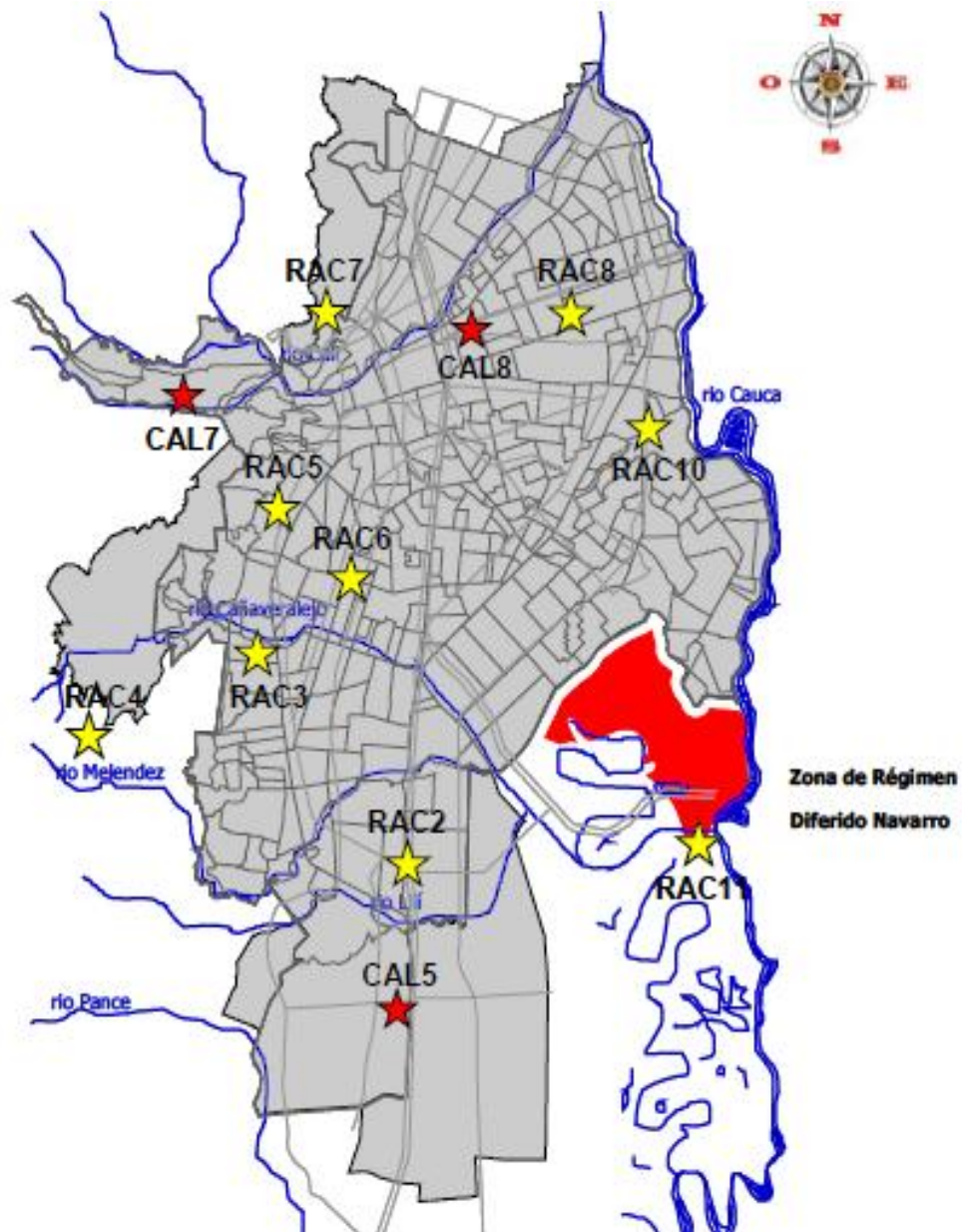
Posteriormente, se realizó la selección de las estaciones de la RPAC y la RAC de acuerdo a los sitios donde fue registrado el sismo, como se muestra en la figura 11. Nueve de las doce estaciones que conforman la Red de Acelerógrafos de Cali (RAC) registraron el sismo, siendo los problemas de fluido eléctrico los causantes de que las demás estaciones no estuvieran funcionando, adicionalmente se obtuvieron tres registros de la red portátil que SGC instaló en el 2003 (Ojeda et al., 2004).

El procesamiento que se realizó a los registros acelerográficos del sismo de Pizarro obtenidos de la página web del Servicio Geológico Colombiano (SGC) seisan.sgc.gov.co, se divide en tres pasos, corrección de línea base, filtro paso-banda para eliminar el ruido de alta y baja frecuencia simultáneamente, la cual se seleccionó de 0.25 Hz a 20 Hz para no eliminar la parte de la señal de interés (Carreño et al., 1999) y por último la corrección de acuerdo a la PGA en cada componente para asegurar este valor en los registros (acelerogramas corregidos en el anexo 2).

A pesar que los registros acelerográficos cuentan con tres componentes, longitudinal (N-S), transversal (E-W) y vertical, en este proyecto se consideró trabajar con las componentes en el plano horizontal, es decir, longitudinal y

transversal. Por otro lado, se identificó en los registros sísmicos que la componente horizontal con la mayor aceleración tenía un mejor comportamiento en el cálculo de la IA, porque su valor disminuía si se usaba la componente de menor aceleración.

Figura 11 Distribución de las estaciones de acelerógrafos (RAC y Portátil) ubicadas en la ciudad de Cali que registraron el sismo de Pizarro. Las estrellas amarillas corresponden a las estaciones de la RAC y las estrellas rojas a las estaciones de la Red Portátil (Ojeda et al., 2004)



4.3. SELECCIÓN DE PERFILES ESTRATIGRÁFICOS

Para la selección de los perfiles estratigráficos se definieron las siguientes consideraciones, que se resumen en la tabla 12 del anexo 3:

- Ensayo de down hole (solo estas perforaciones contienen datos de las características geotécnicas del suelo).
- Ubicación cercana a una estación donde se registró el sismo de Pizarro.
- Periodo fundamental establecido por el Proyecto de Microzonificación Sísmica de Cali que coincida con el reportado por Ojeda et al. (2004) en el reporte del sismo de Pizarro, porque este es el parámetro de control para cada cambio de profundidad.
- Mínimo dos perfiles estratigráficos por microzona.

De acuerdo a la tabla 3 los perfiles a analizar separados por microzona son los siguientes:

Tabla 3 Perfiles estratigráficos seleccionados para el análisis de sensibilidad

No	Código	Zona de respuesta sísmica	Zona geotécnica	RAC	Período (s) MZSCali	Rango de período por microzona
ZONA 4C						
3	VELOD	4C	6d	RAC03	1.3	1.5 - 2
4	PANAM	4C	6d	RAC06	1.5	1.5-2
ZONA 4D						
12	INGEO	4D	6e	RAC02	1	0.5 - 1.3
19	PCR80	4D	6e	RAC02	1	0.5 - 1.3
ZONA 5						
27	MELEN	5	7	RAC02	1.1	1.4 - 2
30	GUADA	5	6e	RAC06	1.5	1.4 - 2
ZONA 6						
1	NAVAR	6	8a	RAC11	2	1.4 – 1.75
26	FLOR	6	8a	RAC10	2	1.4 – 1.75

Para definir las características de los perfiles estratigráficos a partir de las perforaciones realizadas, inicialmente se procedió a agrupar los estratos con el mismo material tipo y curva de degradación para sumar los espesores y promediar los valores de la Vs y la densidad de cada estrato, puesto que es necesario encontrar un valor que represente a todas las capas agrupadas.

A continuación en la tabla 4 se define el rango de variación de la profundidad al restar una capa del perfil en cada cambio de profundidad.

Tabla 4 Variación de la profundidad de cada perfil estratigráfico

No	Localización	Código BDG	Profundidad Total (m)	Rangos a variar
3	Velódromo	VELODP3	51.9	9.3, 16.7, 18.7, 28.3, 35.9, 38.7, 41.5, 43.2, 49.2, 51.9
4	Panamericanas	PANAMP4	47.6	1.5, 2.8, 7.2, 7.8, 8.7, 10.8, 11.8, 12.8, 13.2, 14.8, 19.8, 20.3, 27.4, 32.4, 34.9, 40, 40.9, 43.2 47.6
12	SGC	INGEOP12	50.4	8.7, 13.8, 18.9, 19.9, 20.4, 26, 26.8, 28.5, 32.4, 33, 35, 39.4, 44.4, 47.4, 49.4, 50.4
19	Pasoancho con Cr. 80	PCR80P19	38.7	10.5, 13.5, 16, 22.2, 22.5, 23, 28.3, 29.5, 31.3, 35.6, 36.5, 38.7
27	Meléndez	MELENP27	24.4	3.2, 5, 6.8, 11, 16, 18, 23.6, 24.4
30	Guadalupe con Calle 14	GUADAP30	48	2.2, 6, 12, 14.9, 18, 24, 24.8, 26.9, 30, 36, 39, 40.1, 40.9, 48
1	Navarro	NAVARP1	10.4	2.4, 4.2, 5.9, 7.4, 10.4
26	Floralia	FLORP26	38.2	6.5, 8.4, 9.7, 14.5, 22, 23, 25.5, 30.6, 31 34.1, 38.2

En la figura 39 del anexo 3 se muestra la ubicación de los perfiles y las estaciones seleccionadas para el análisis de sensibilidad.

4.4. MODELO DE BASAMENTO SÍSMICO

En el estudio de la microzonificación sísmica de Cali se utilizó el modelo de basamento sísmico para la calibración de los perfiles estratigráficos, al encontrar la profundidad en la cual la respuesta espectral es más parecida a la registrada en superficie, y para garantizar que el periodo fundamental T_p del depósito sea aproximadamente igual al periodo reportado en el mapa de isoperiodos de la MZSCali (2005). En el presente proyecto se siguió la misma metodología para garantizar que el parámetro de control que es el periodo fundamental permanezca constante al variar la profundidad y encontrar el espesor y la V_s de la capa que precede a la roca para cada cambio de profundidad hasta la cual está la información experimental del perfil.

A continuación se describe el procedimiento utilizado para la aplicación del Modelo de Basamento Sísmico:

1. Determinar el Vs promedio del perfil hasta Hn que es la profundidad hasta donde se realizó el ensayo de down hole.
2. Calcular hu (espesor de la capa que precede a la roca) con el Hn, Vs y el periodo fundamental reportado en la MZSCali (2005) según la ubicación del perfil, de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$h_u = \frac{V_s \cdot T_p - 4H_n}{4}$$

3. Calcular la profundidad total del perfil H, que es la sumatoria de hu y Hn.
4. Determinar el periodo de la capa 1 hasta la última t_{1-u} y el periodo de la capa 1 hasta la roca t_{1-n} , como se muestra en las siguientes ecuaciones:

$$t_{1-u} = \frac{H}{V_s}$$

$$t_{1-n} = \sum_{i=1}^n \frac{h_i}{V_{si}}$$

5. Calcular el periodo de la última capa del perfil t_u

$$t_u = t_{1-u} - t_{1-n}$$

6. Determinar el valor de Vs de la última capa

$$V_{su} = \frac{h_u}{t_u}$$

7. El material tipo, la densidad y la curva de degradación de la última capa se determinaron al relacionar el valor de V_{su} con los definidos en las demás capas pertenecientes al perfil estratigráfico.

Los parámetros encontrados H, Vs y Tp permanecen constantes en el modelo en cada perfil estratigráfico, mientras que Hn cambia de acuerdo al rango de variación de la profundidad establecido en la tabla 12, y hu aumenta el espesor para conservar el valor de H, por lo tanto, desde el numeral dos se recalculan los valores en cada cambio de profundidad. Se consideró que solo influían los valores de Hn puesto que son los datos reales del perfil estratigráfico y hu es una capa calculada analíticamente, la cual se podría calibrar para que se obtengan los resultados esperados. En el anexo 5 se muestran las características geotécnicas de los perfiles obtenidos al aplicar el modelo de basamento sísmico.

4.5. PROCEDIMIENTO PARA ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE CADA PERFIL

La modelación de los perfiles estratigráficos se realizó mediante el programa EFE-SIO 1.8.1 (Efectos de sitio) que tiene como objetivo calcular la respuesta dinámica de un estrato de suelo mediante la evaluación de la atenuación o amplificación en magnitud y frecuencia de una señal sísmica. EFE-SIO hace parte de un Laboratorio Virtual de Ingeniería sísmica (SISMILAB) que ha sido desarrollado en la Universidad del Valle por el grupo de investigación G-7 de la Escuela de Ingeniería Civil y Geomática bajo el apoyo de RENATA (Red Nacional Académica de Tecnología Avanzada) y el Ministerio Nacional de Educación (Mantilla, 2013).

Para la simulación de cada uno de los perfiles estratigráficos se utilizó el código de EFE-SIO 1.8.1 realizado en MatLab, que permite programar el ingreso y variación de los datos de manera eficiente, como es el caso de las características geotécnicas de cada estrato, la determinación del valor de la función que relaciona los datos experimentales y analíticos en cada variación de V_s en roca para el rango de profundidad establecida en el perfil.

La metodología con la que se evaluó la respuesta sísmica en el presente proyecto fue el análisis lineal equivalente, en el cual son necesarias las curvas de degradación definidas para cada capa del perfil estratigráfico. La razón de amortiguamiento ya no es un parámetro variable sino que se calcula automáticamente de acuerdo a las curvas de degradación introducidas y se define con un parámetro de convergencia de cinco ciclos, porque se observó que se alcanzaba una diferencia menor al 5%. El programa EFE-SIO después de la última capa del perfil tiene en cuenta las características geotécnicas de la roca como el V_s , por lo tanto, en el análisis se utilizó un rango de variación de la V_s en roca de 700 m/s a 1600 m/s, porque se observó que los valores utilizados en el estudio de microzonificación sísmica estaban en este rango.

El parámetro en el que se basó el análisis de sensibilidad es la Intensidad de Arias IA porque determina el riesgo sísmico de un área, los daños que un sismo provoca en las estructuras y edificaciones, el patrón de amplificación o de atenuación de las ondas sísmicas que viajan por el interior de la tierra (Schmidt, 2008), por lo anterior, es utilizada por los ingenieros cuando se diseñan distintos tipos de obra, ya que permite determinar la reacción de un suelo determinado ante un movimiento sísmico (Schmidt, 2008).

Se identificó las tendencias de la IA al observar las variaciones para las diferentes profundidades establecidas, mediante la siguiente función (FO) de los resultados experimentales y analíticos:

$$FO = \left| \frac{1-I^2}{1+I^2} \right|^{0.25} \quad \text{Función de correlación}$$

Donde:

$$I = \frac{\text{Intensidad de Arias analítico}}{\text{Intensidad de Arias experimental}}$$

La Intensidad de Arias analítico y experimental se calcula mediante la ecuación:

$$IA = \frac{\pi}{2g} \int_0^t a^2(t) dt$$

Donde $a(t)$ de la IA analítico es el registro sísmico seleccionado en el ítem 4.2 y en IA experimental es la respuesta en superficie de la aceleración obtenida de EFE-SIO.

La FO obtiene un buen resultado si esta entre 0 y 0.75, después de este rango se consideró que tenían poca correlación porque al hacer una evaluación de la función se evidencio que si IA tiende a 1 (valor en el cual la IA analítica y experimental son iguales) FO tiene un valor 0. Se considera un porcentaje de error de la Intensidad de Arias del 25%, debido a que las señales utilizadas para modelación contienen ruido, la estación seleccionada en roca se encuentra en diferente ubicación a las ubicadas en suelo como se observa en la figura 39 del anexo 3, además la señal posiblemente contiene modificaciones durante su recorrido y es seleccionada como una aproximación de la señal de entrada en roca del caso ideal, que consistiría en que la estación en roca estuviera en la misma ubicación simplemente que a una profundidad en roca. Al asumir un error del 25% se obtiene que el valor máximo que puede tomar I es 0.75, y en la ecuación FO daría como resultado 0.73 aproximadamente.

4.6. ESPECTROS DE RESPUESTA Y DE DISEÑO

La selección de las señales de diseño (Tabla 5) se realizó a partir de las establecidas en la MZSCali (2005), de las cuales se escogieron dos sismos compatibles con las fuentes corticales, 2 con la fuente de subducción superficial y 2 con la fuente de subducción profunda.

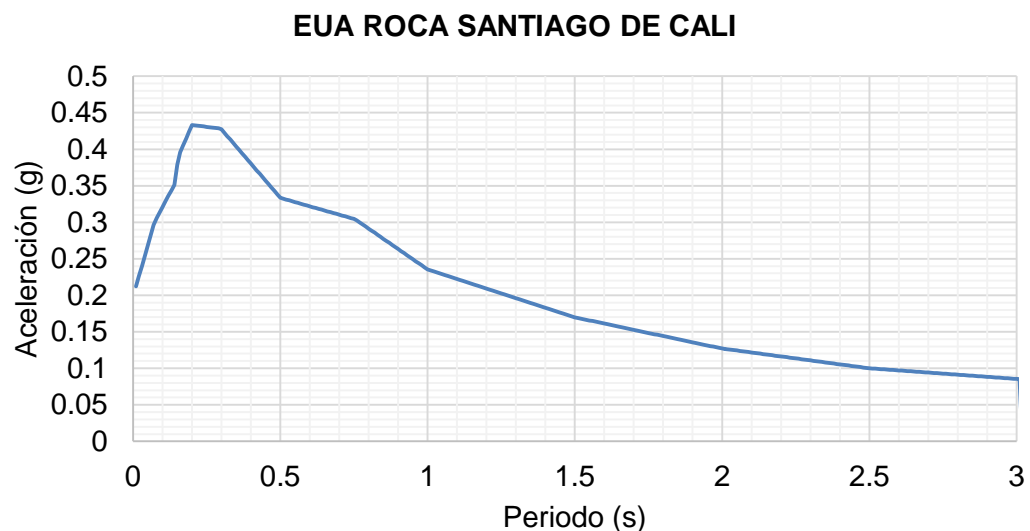
Tabla 5 Señales de diseño seleccionadas

Origen	Fecha	Fuente	Profundidad (Km)	PGA (g)	Mw	Tipo
Irán	22/06/2002	Cortical	15	0.164	6.5	TC
Japón	26/09/1997	Cortical	12	0.172	6.5	TL

Inglewood	17/05/2009	Subducción Superficial	20.5	0.218	4.7	TC
Nueva Zelanda	03/09/2010	Subducción Superficial	34.5	0.111	7.1	TC
Chile	13/06/2005	Subducción Profunda	117	0.222	7.9	TL
Japón	26/05/2003	Subducción Profunda	61	0.175	7	TL

La metodología usada para la construcción de los espectros de diseño se basa en el Espectro de Amenaza Uniforme (EUA) en superficie que se obtiene de calcular la relación espectral entre el espectro de respuesta de la señal en suelo y el espectro de respuesta de la señal en roca para cada perfil definido y multiplicar por el EUA en roca para Santiago de Cali (figura 12) tomado del informe 1.9 Amenaza Sísmica (MZSCali, 2005).

Figura 12 Espectro de amenaza uniforme en roca para la ciudad de Santiago de Cali



Los espectros de diseño fueron elaborados a partir de los perfiles donde se obtuvo una buena correlación de la FO (valor inferior a 0.75 para ser aceptable). La profundidad y el Vs en roca se seleccionaron de acuerdo al valor mínimo obtenido de FO. El espectro de diseño para cada perfil se calculó de acuerdo a la formulación descrita en la figura 5.1 del informe 5.2 Respuesta Sísmica para los sismo tipo TC, TL y los promedios de estos. Luego se comparó cada espectro de diseño con el calculado en la MZSCali (2005) de acuerdo a la microzona donde se ubica el perfil estratigráfico y el de la NSR-10 según el tipo de perfil identificado a la profundidad encontrada para FO mínimo.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se exponen los resultados obtenidos de comparar la respuesta sísmica modelada y registrada durante el sismo de Pizarro mediante las gráficas de la función de correlación FO vs. Vs en roca para cada rango de profundidad definida de los perfiles.

Posteriormente, se definió en cada perfil la profundidad en la cual FO se obtiene el menor valor y con este dato elaborar los espectros de respuesta. Por último, se determinó el espectro de diseño mediante la metodología del Espectro de Amenaza Uniforme (EUA) en superficie y se comparó con los espectros de diseño de la MZSCali (2005) y la NSR-10.

5.1. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

A continuación se presenta el análisis de sensibilidad de cada perfil estratigráfico agrupado por las zonas definidas en la Microzonificación Sísmica de Cali. Los resultados obtenidos de la FO se esquematizan para cada perfil de acuerdo a la respuesta sísmica en el sismo de Pizarro, relacionando el rango de las profundidades establecidas y la variación de Vs en roca.

5.1.1. ZONA 4C

El perfil estratigráfico del Velódromo presenta un 65% de material típico limoso en su mayoría M2 (limo arcilloso y arcilla limosa), 18% de material típico arcilloso, 10% de arenoso y 5% orgánico. El 90% de las curvas de degradación están definidas como finos. En Velódromo los valores de Vs varían de 246.7 a 410 m/s y \overline{Vs} de 214.45 m/s a 324.32 m/s, por lo tanto se puede clasificar como un tipo de perfil D, que es considerado en la NSR-10 como un perfil de suelos rígidos (Tabla 13 Anexo 5).

Por otro lado, el perfil de Canchas Panamericanas está compuesto por un 42% de material típico limoso, 30% arcilloso, 18% arenoso, 6% gravoso y 4% orgánico. Las curvas de degradación están definidas el 68% por finos. En Canchas Panamericanas Vs varía de 161.3 a 466.7 m/s, con un \overline{Vs} de 200 y 366.87 m/s, por lo tanto, se podría clasificar como un tipo de perfil D en todas las profundidades a excepción de 10.8m, 27.4m y 32.4m que se estiman como un tipo de perfil C que se considera como un perfil de suelos muy densos o roca blanda según la NSR-10 (Tabla 14 Anexo 5).

En la figura 13 se muestran los resultados de la FO al variar la profundidad del perfil y la Vs en roca, en ella se observa que el valor mínimo de la FO en Velódromo es 0.73 en 9.3 m con Vs en roca de 1600 m/s y en la figura 14 Canchas Panamericanas es 0.92 en 2.8 m con Vs en roca de 1600 m/s. En general los dos perfiles analizados obtienen una baja correlación en todas las profundidades. Ambas figuras muestran que tienen tendencias similares obteniendo el valor mínimo de FO en Vs en roca de 1600 m/s, por lo que se concluye que son importantes las características de la roca, en especial tener un valor preciso de la Vs para la respuesta dinámica del perfil, ya que se observa grandes diferencias entre los valores de FO al variarla en todas las profundidades.

Al comparar los valores Vs de los perfiles estratigráficos en cada rango establecido para la variación de las profundidades con los resultados obtenidos del valor mínimo de FO se observa que en el estrato de 9.3m del Velódromo y 2.8m de Canchas Panamericanas presentan un cambio significativo en el valor de Vs con los otros rangos, aumentando 120 m/s y 170 m/s respectivamente (figura 40 y 41 anexo 3), por lo tanto se podría considerar que en estas profundidades el perfil no es rígido, su amplificación es importante en la respuesta dinámica del suelo.

En concordancia con la investigación de Vergnaud (1973) se considera muy importante el espesor de un material blando cuando este determina la profundidad de la roca, como en el caso del perfil de Canchas Panamericanas en el que parece influir en los resultados de FO ya que no se obtiene ningún valor aceptable, en este perfil las dos últimas capas pueden ser consideradas como material blando debido a que su Vs es menor a 180 m/s, siendo esta una excepción entre ambos perfiles.

Figura 13 FO IA vs. Vs en Roca para cada profundidad, Velódromo

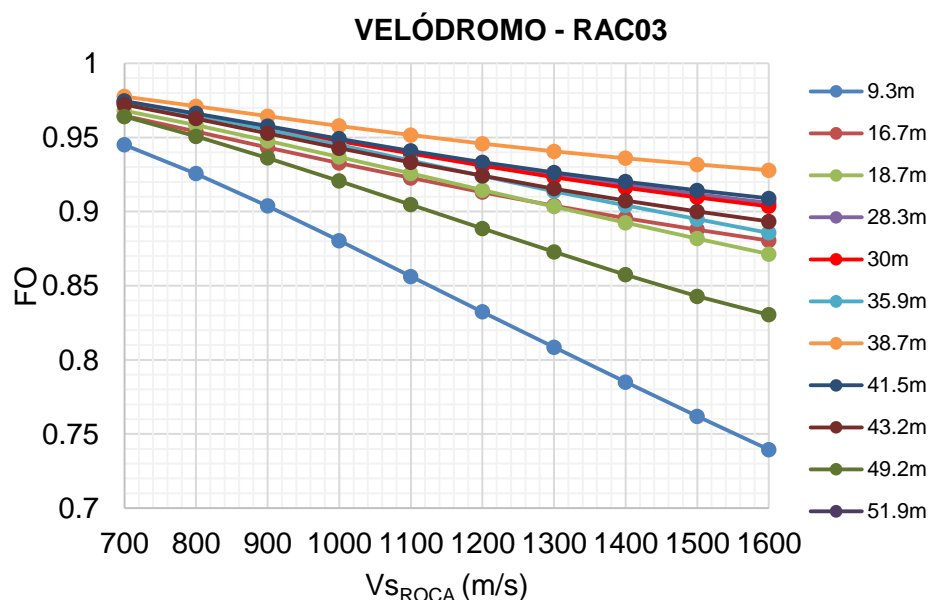
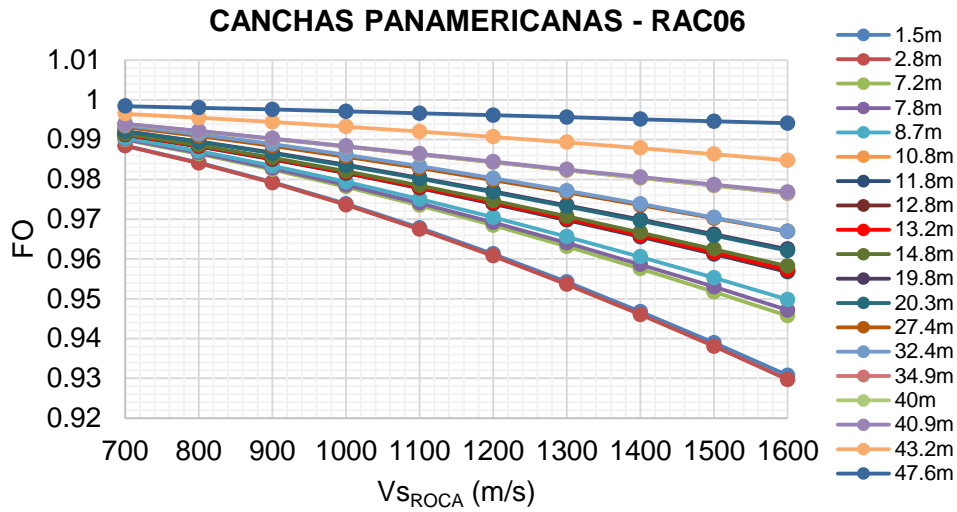


Figura 14 FO IA vs. Vs en Roca para cada profundidad, Canchas Panamericanas



5.1.2. ZONA 4D

El perfil estratigráfico de INGEOMINAS presenta un 47% de material típico limoso como M1 (limo arenoso y arcilla arenosa), M2 (limo arcilloso y arcilla limosa) y M3 (limo arcilloso), 28% de material típico arenosos como S1 (arena fina y arena limosa) y S3 (arena fina limosa) y 25% de material típico gravoso G2 (grava gruesa y cantos, material de Abanico Aluvial de Pance) y G3 (grava gruesa y cantos, material de Abanico Aluvial), predominando los materiales finos de muy baja, baja, moderada y alta degradación, solo tiene una capa de materia orgánica al final del perfil. Los valores de Vs varían de 218 a 330 m/s, \bar{Vs} de 218 a 297.45 m/s, por lo tanto, se podría clasificar como un tipo de perfil D (Tabla 15 Anexo 5).

El perfil estratigráfico de Pasoancho con Cr.80 presenta un 58% de material típico limoso como M1, M2 y M3, 5% de material típico arenosos de S1, 23% de material típico gravoso G3 y 14% de material típico arcilloso como C2 (arcilla limosa, colores habano, amarillo y rojizo) y C4 (arcilla limosa, color azul con vetas habanas), predominando los materiales finos de baja, moderada y alta degradación. Los valores de Vs varían de 198.89 m/s a 400 m/s, con un \bar{Vs} de 257.74 m/s a 313.44 m/s, así que se podría clasificar como un tipo de perfil D (Tabla 16 Anexo 5).

Según la figura 15 INGEOMINAS se observa que el valor mínimo de FO es 0.258 en 28.5 m con Vs en roca de 700 m/s y en la figura 16 Pasoancho con Cr.80 es 0.322 en 10.5m con Vs en roca de 700 m/s. En ambos perfiles se obtiene una buena correlación de FO y predominan materiales limosos y con presencia de estratos granulares. Igualmente se aprecia una tendencia aproximadamente parabólica logrando el punto más bajo con Vs en roca de 700 m/s y con un valor

de V_s en la última capa de 280 m/s a pesar de ser tan diferentes las alturas consideradas como las de mejores resultados. Sin embargo, se muestra en ambas figuras que se obtiene FO aceptable para todas las profundidades analizadas dependiendo del valor de V_s en roca, en INGEOMINAS es aceptable de 700 a 900 m/s y en Pasoancho de 700 a 1000 m/s, resaltando la importancia de las características de la roca en la respuesta dinámica del perfil, debido a que se obtienen mejores resultados en profundidades muy distintas, variando de 28.5 a 50.4m y de 10.5 a 38.7m.

Figura 15 FO IA vs. V_s en Roca para cada profundidad, INGEOMINAS

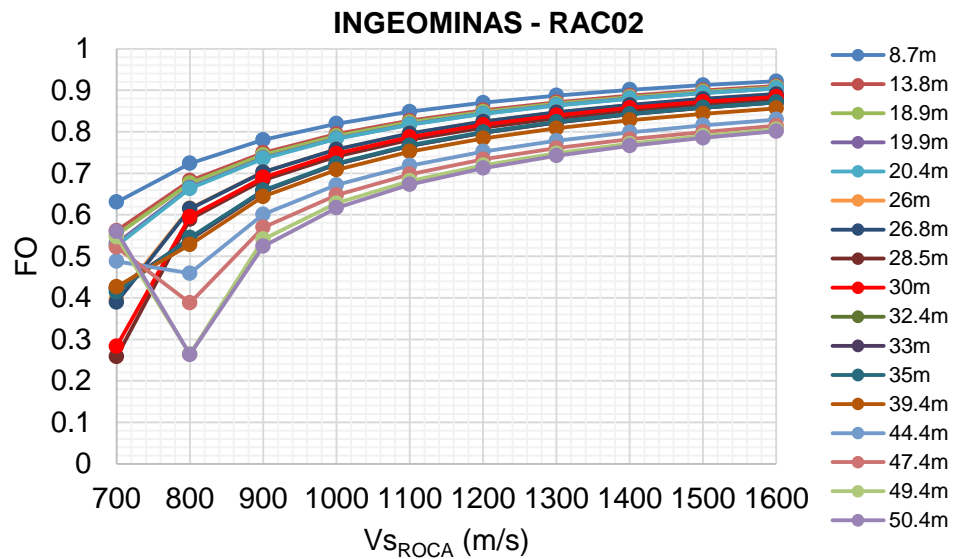
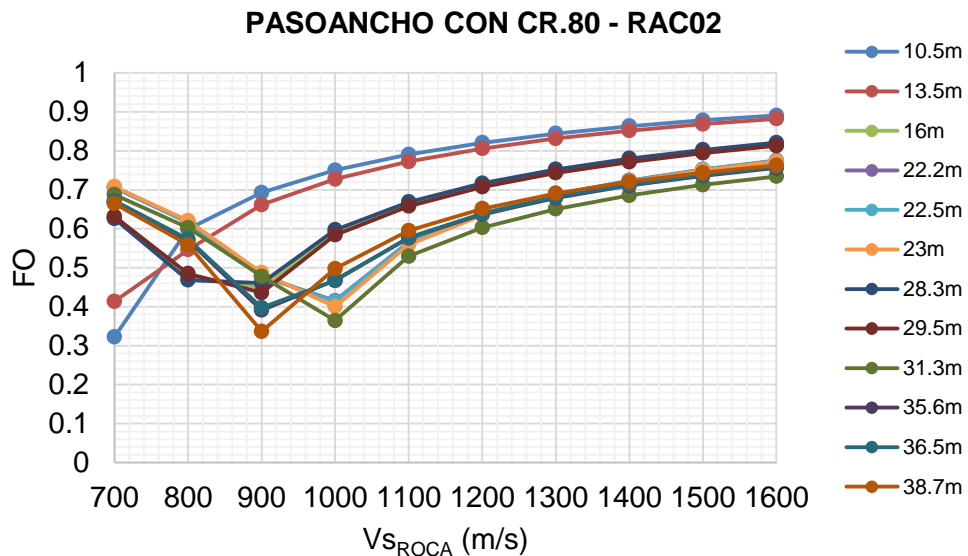


Figura 16 FO IA vs. V_s en Roca para cada profundidad, PCR.80



5.1.3. ZONA 5

El perfil estratigráfico de Meléndez presenta un 20.5% de material típico limoso como M1 y M2, 16% de material típico arenosos como S2 (arena media a gruesa) y S3, 43% de material típico gravoso G3 y 20.5% de material típico arcilloso como C1 (arcilla limosa y limo arcilloso), por lo anterior se concluye que predominan los materiales gravosos. Los valores de Vs varían de 153.33 m/s a 524 m/s, con un \overline{Vs} de 153.33 m/s y 324.21 m/s por lo tanto, se podría clasificar como un tipo de perfil E de 3.2 a 5 m que se considera como un perfil de suelo blando, y D desde 6.8 a 24.4 m (Tabla 17 Anexo 5).

El perfil de Guadalupe está compuesto por un 40% de material típico limoso como M2, M3, M5, 19 de material típico arenosos como S1, 19% de material típico gravoso como G3, 4% de material típico arcilloso como C1 y 19% de material típico orgánico P1 (Materia orgánica) y P2 (Limo orgánico). Los valores de Vs varían de 176.25 m/s a 455 m/s, con un \overline{Vs} de 237.15 y 424.29 m/s, por lo tanto, se podría clasificar como un tipo de perfil C que es considerado como un perfil de suelos muy densos en las profundidades de 2.2 m a 12 m y en las demás como un tipo de perfil D (Tabla 18 Anexo 5).

De acuerdo a la figura 17 en el perfil de Meléndez el valor mínimo de FO es 0.133 el cual se alcanza en 18 m con Vs en roca de 900 m/s y en la figura 18 el perfil de Guadalupe es 0.929 en 2.2m con Vs en roca de 1600 m/s, este último obtiene una baja correlación entre la respuesta modelada y registrada en todas las profundidades evaluadas. Por lo tanto, se observa un comportamiento totalmente diferente en ambos perfiles a pesar de encontrarse en la misma microzona sísmica, Meléndez tiene un comportamiento parabólico similar al de los perfiles de INGEOMINAS y Pasoancho, con una buena correlación con Vs en roca de 700 a 1200 m/s en todas las profundidades pero obteniendo su valor más bajo con Vs en roca de 900 m/s.

Al comparar los perfiles se observa que \overline{Vs} en estas profundidades tiene un valor similar, además su evaluación se realiza con el registro sísmico de RAC02 y su ubicación es cercana, a pesar de pertenecer a otra microzona y que predominen materiales distintos. El perfil de Guadalupe tiene una tendencia lineal y un comportamiento similar al perfil de Canchas Panamericanas, ambos perfiles tiene en común que la última capa del perfil es un material blando con Vs menor a 180 m/s, por lo tanto, se considera muy importante el espesor de un material blando cuando este determina la profundidad de la roca.

Figura 17 FO IA vs. Vs en Roca para cada profundidad, Meléndez

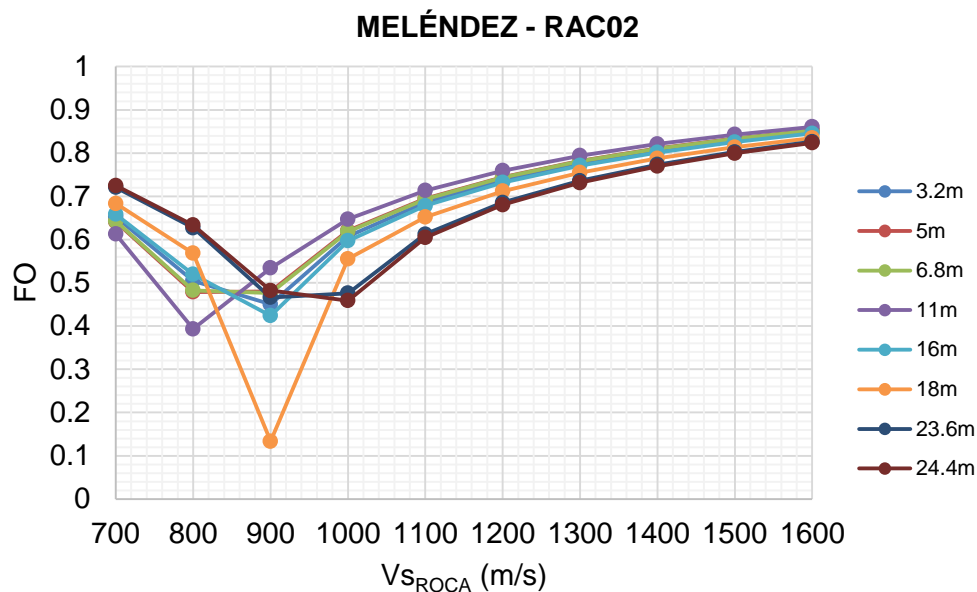
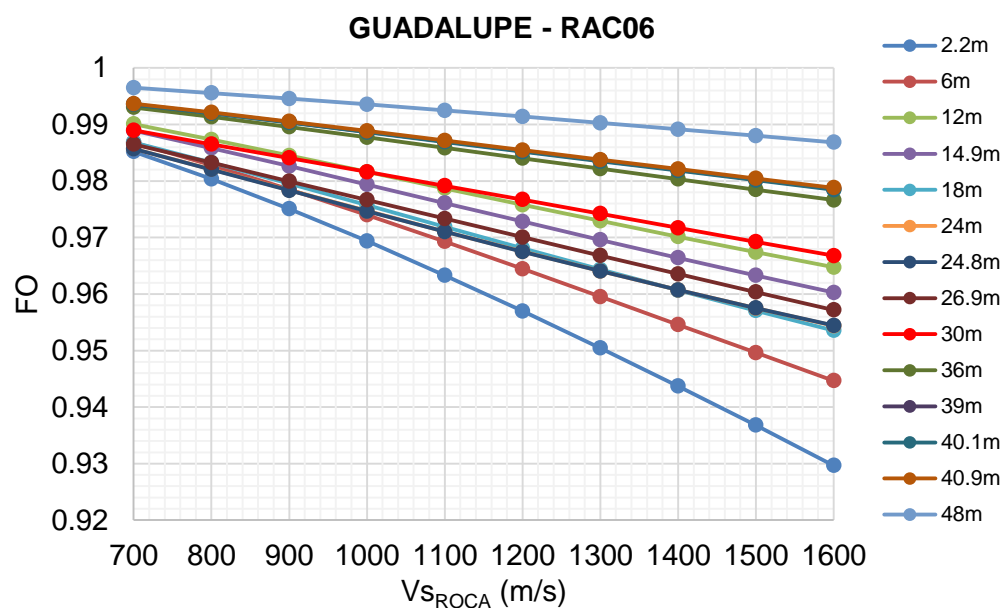


Figura 18 FO IA vs. Vs en Roca para cada profundidad, Guadalupe



5.1.4. ZONA 6

El perfil de Navarro presenta un 45% de material típico arenoso, 38% de material típico arcilloso y 17% de material típico limoso, predominando los materiales finos de moderada degradación. Los valores de Vs varían de 232.5 a 350 m/s, con un

\overline{Vs} de 278.33 a 304.13 m/s, por lo tanto, se podría clasificar como un tipo de perfil D en todas las profundidades (Tabla 19 Anexo 5).

El perfil estratigráfico de Floralia se compone por un 49% de material típico arenoso, 25% de material típico arcilloso, 23% de material típico gravoso y 3% de material típico limoso. Predominan los materiales granulares. Los valores de Vs varían de 170 a 390 m/s, con un \overline{Vs} de 250.04 a 287.06 m/s, por lo tanto, se podría clasificar como un tipo de perfil D en todas las profundidades (Tabla 20 Anexo 5).

De acuerdo a la figura 19 el perfil de Navarro el valor mínimo de FO es 0.287 en 5.9m con Vs en roca de 1000 m/s y en la figura 20 el perfil de Floralia es 0.842 en 6.5m con Vs en roca de 1600 m/s. En Floralia se observa que no se obtiene una buena correlación en ninguna de las profundidades evaluadas y una tendencia aproximadamente lineal similar a los perfiles de Canchas Panamericanas y Guadalupe. Y al igual que en los perfiles mencionados las ultimas capas contienen material considerado con blando por tener valores de Vs igual o menor a 180 m/s.

En Navarro solo en 5.9m se presentan valores de FO aceptables y presenta un comportamiento aproximadamente parabólico similar al de INGEOMINAS, Pasoancho y Meléndez. Ambos perfiles logran el FO mínimo en un estrato de suelo donde predomina un material tipo arcilloso C1.

Figura 19 FO IA vs. Vs en Roca para cada profundidad, Navarro

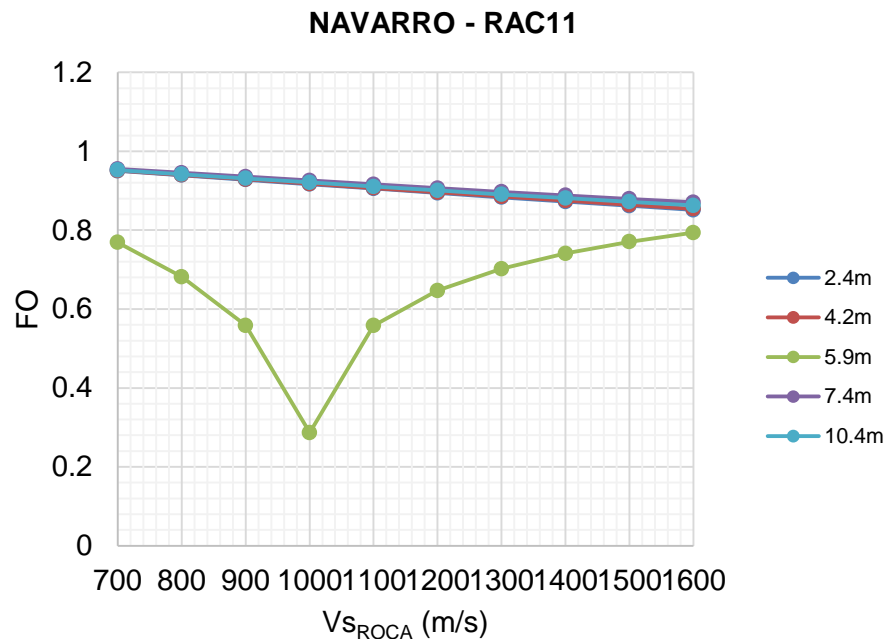
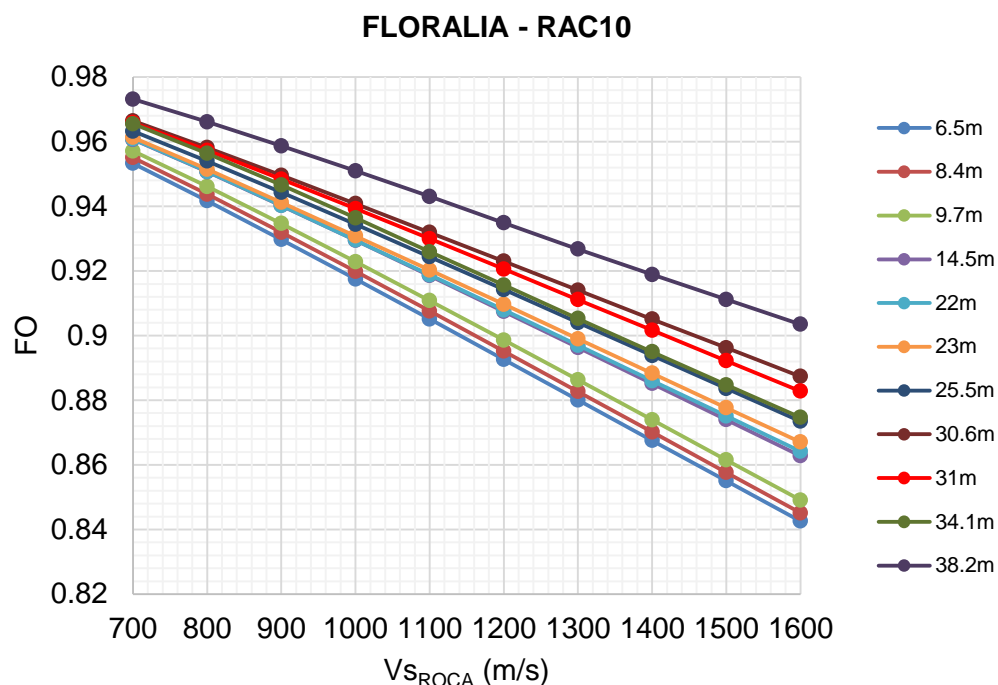


Figura 20 FO IA vs. Vs en Roca para cada profundidad, Floralia



5.1.5. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

A continuación en la tabla 6 se muestra un resumen de los resultados obtenidos para cada perfil:

Tabla 6 Resumen de los resultados obtenidos

Perfil Estratigráfico	Estación	Microzona	H (m)	Vs _{ROCA} (m/s)	\overline{Vs} (m/s)	FO
Velódromo	RAC03	4C	9.3	1600	246.7	0.73
Canchas Panamericanas	RAC06	4C	2.8	1600	233.7	0.92
INGEOMINAS	RAC02	4D	28.5	700	266.7	0.26
Pasoancho con Cr.80	RAC02	4D	10.5	700	280	0.32
Meléndez	RAC02	5	18	900	288.9	0.13
Guadalupe	RAC06	5	2.2	1600	380	0.93
Navarro	RAC11	6	5.9	1000	303.9	0.29
Floralia	RAC10	6	6.5	1600	250.6	0.84

De acuerdo a la tabla 6 se observa que se obtuvieron los buenos resultados en cinco de los ocho perfiles, los cuales son: Velódromo, INGEOMINAS, Pasoancho

con Cr.80, Meléndez y Navarro, ya que cumplen que el valor de FO sea inferior a 0.75, logrando valores entre 0.13 y 0.73.

Por otro lado, se identificó que los perfiles de Canchas Panamericanas, Guadalupe y Floralia que contenían en su estratigrafía original una última capa de material considerado como blando por su Vs menor a 180 m/s, no se lograba obtener un valor inferior a 0.75 de FO al variar su profundidad, por lo anterior se podría decir que esta capa no se puede despreciar y se debe tener en cuenta para la posición de la roca ya que parece incidir en su respuesta en superficie como lo mencionó Vergnaud (1973) en su investigación.

También, al analizar los resultados de variar el valor de la Vs en roca se observa que este incide en gran medida en los resultados de la respuesta del suelo, debido a que las características de la roca son importantes en la modelación, y dependiendo de su precisión el valor de FO podría aumentar o disminuir en los perfiles.

Los perfiles de INGEOMINAS y Pasoancho con Cr.80 están en la misma microzona, sin embargo, se obtienen distintas profundidades donde FO es mínimo, el primero en 28.5m y el segundo en 10.5m, lo anterior resalta los efectos de generalizar áreas pues un ensayo a 28.5m será más costoso y con dificultades técnicas que uno a 10.5m, además de las posibles implicaciones en el diseño que puede repercutir en la seguridad de la edificación y costos.

Por último, se encontraron buenos resultados en profundidades inferiores a los primeros 30 metros propuestos en la NSR-10, como en los perfiles de Navarro (9.5m), Meléndez (18m), Pasoancho con Cr.80 (10.5m) y Velódromo (9.3m), por lo tanto, se podría decir que los estratos superficiales son los más influyentes de la respuesta sísmica de los suelos, como en la investigación de Montalva et al. (2011), que encontraron para altas frecuencias los cinco metros superficiales, Vs₅, un mejor predictor de la amplificación.

5.2. ESPECTROS DE RESPUESTA Y DE DISEÑO

Para la elaboración de los espectros de diseño inicialmente se seleccionaron las profundidades para cada perfil donde se encontró el menor valor de FO, luego se obtuvieron los espectros de respuesta para un amortiguamiento ξ del 5%, la relación espectral y el EUA en superficie para cada perfil (Anexo 6). Por último se determinó los espectros de diseño para comparar con los de la MZSCali (2005) y la NSR-10.

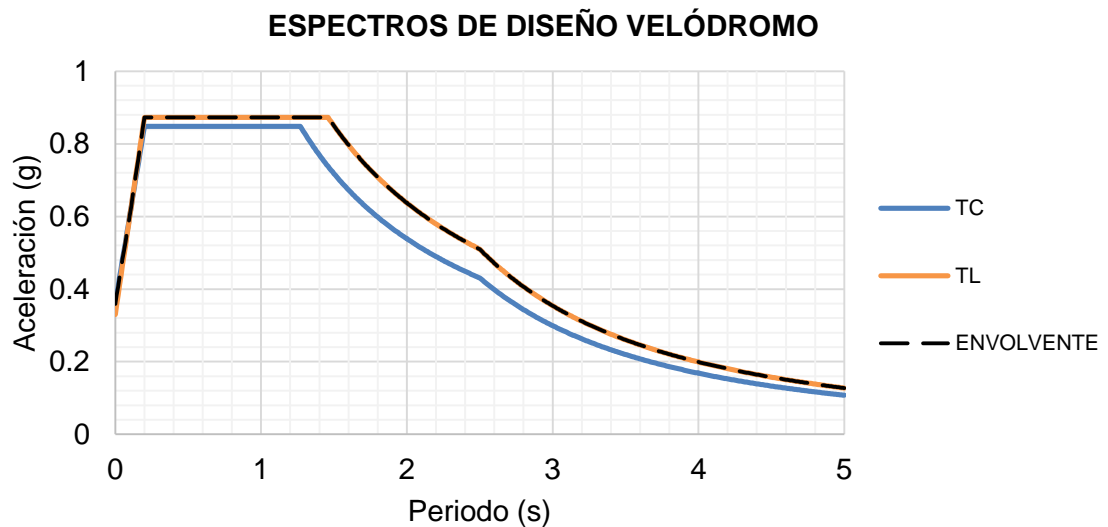
A continuación se presenta por cada microzona los espectros de diseño y la comparación de estos con los calculados de acuerdo a la NSR-10 y la MZSCali (2005) para los perfiles seleccionados.

5.2.1. Zona 4C

En la zona 4C se seleccionó el perfil de Velódromo por obtener un valor de 0.73 para FO en 9.3m con Vs en roca de 1600 m/s, para la elaboración del espectro de diseño.

La figura 21 muestra los espectros de diseño del perfil de Velódromo de acuerdo a los promedios de los sismos tipo TC, TL y envoltente de estos. En este se observa que el valor máximo de la aceleración para este perfil es 0.87 g al seleccionar la envoltente.

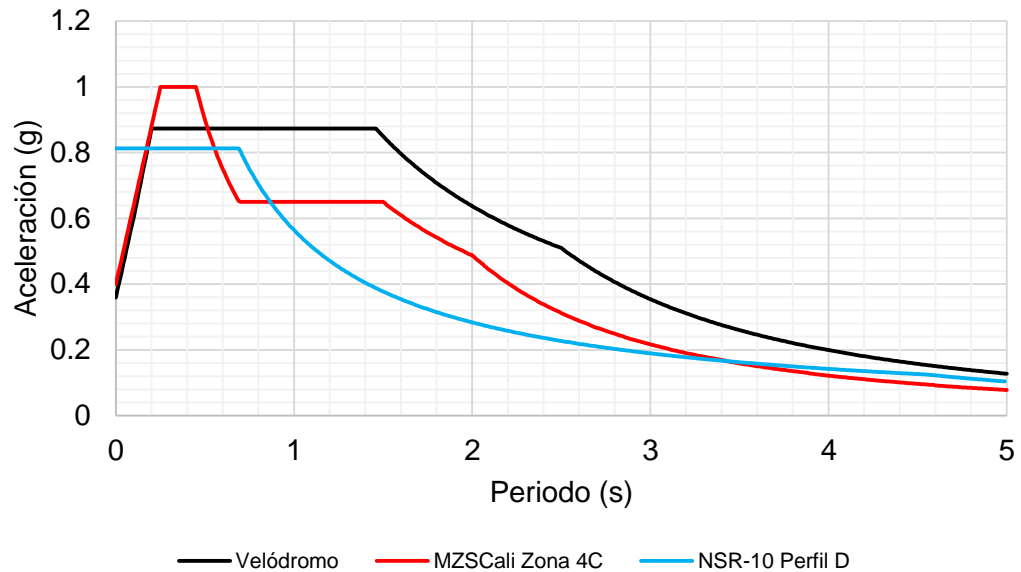
Figura 21 Espectros de diseño mediante EUA Velódromo



En la figura 22 se muestra la comparación entre los espectros de diseño de la NSR-10, MZSCali (2005) y el obtenido del perfil de Velódromo en la presente investigación mediante la metodología EUA. En esta figura se observa que para periodos entre 0 y 0.24 s Velódromo y la MZSCali (2005) tienen el mismo comportamiento, sin embargo, entre 0.24 y 0.55s su tendencia cambia y MZSCali (2005) es mayor un 13%. A partir de 0.55 s los valores de aceleración máxima incrementa aproximadamente un 55% respecto a la NSR-10 y 31% con MZSCali (2005), esto se debe a la consideración de tomar el mayor valor de la aceleración en EUA en superficie entre los periodos 0.30 y 1.50 s (figura 50 Anexo 6).

Figura 22 Comparación de Espectro de diseño Velódromo

COMPARACIÓN ESPECTROS DE DISEÑO - VELÓDROMO



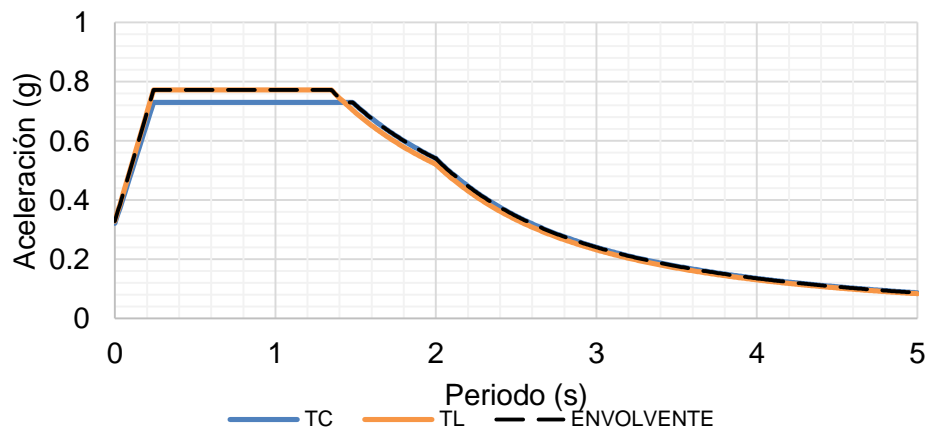
5.2.2. Zona 4D

En la zona 4D se seleccionó el perfil de INGEOMINAS y Pasoancho con Cr. 80 por obtener un valor para FO menor a 0.75, con una profundidad de 28.5 y 10.5 m respectivamente con Vs en roca de 700 m/s para ambos.

En la figura 23 se muestra que para el perfil de INGEOMINAS el valor máximo de la aceleración para este perfil es 0.77 g al seleccionar la envolvente.

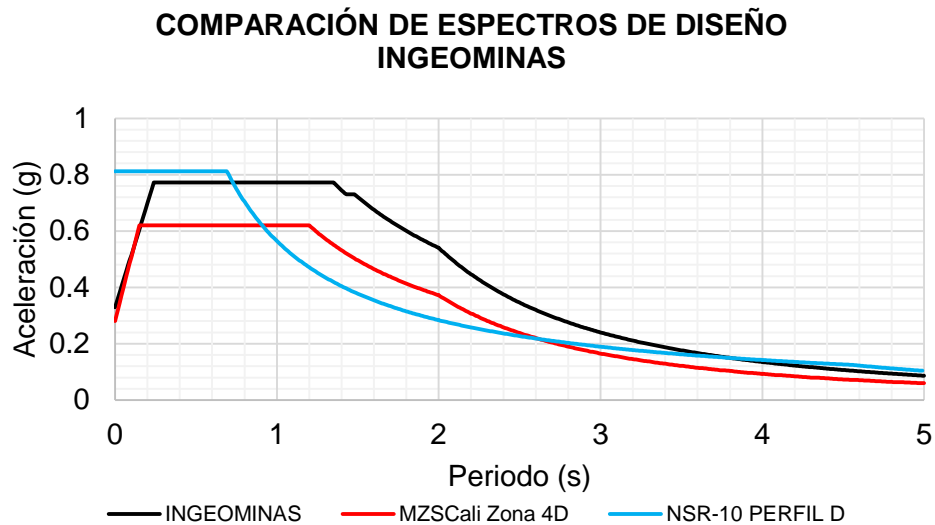
Figura 23 Espectros de diseño mediante EUA INGEOMINAS

ESPECTROS DE DISEÑO INGEOMINAS



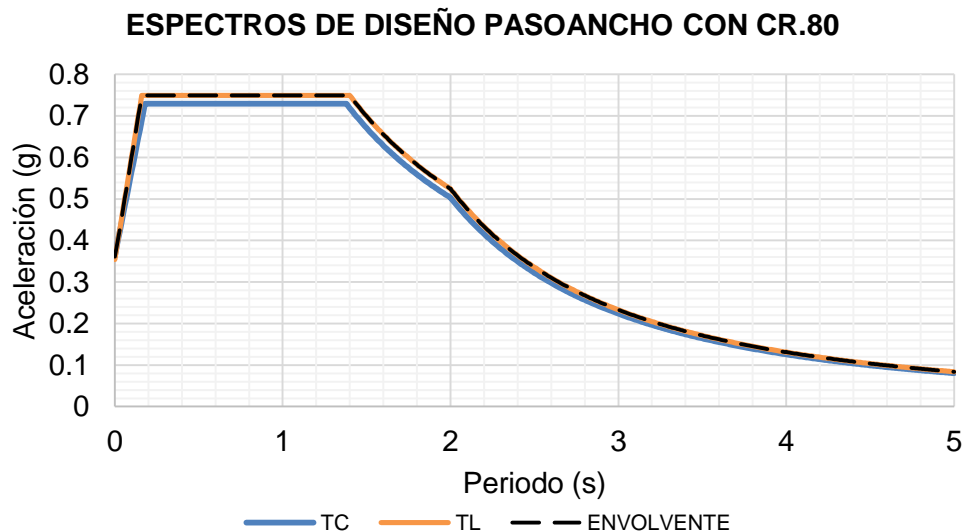
En la figura 24 se muestra la comparación entre los espectros de diseño de la NSR-10, MZSCali (2005) y el obtenido del perfil de INGEOMINAS. Se observa que INGEOMINAS y MZSCali (2005) tienen un comportamiento similar pero la aceleración es superior en INGEOMINAS desde el periodo 0.14 s hasta por un 21%. Respecto a la NSR-10 es inferior hasta el periodo de 0.75 s y a partir de este se diferencian hasta por 0.38 g, sin embargo, inicia a disminuir desde 1.39 s.

Figura 24 Comparación de Espectro de diseño INGEOMINAS



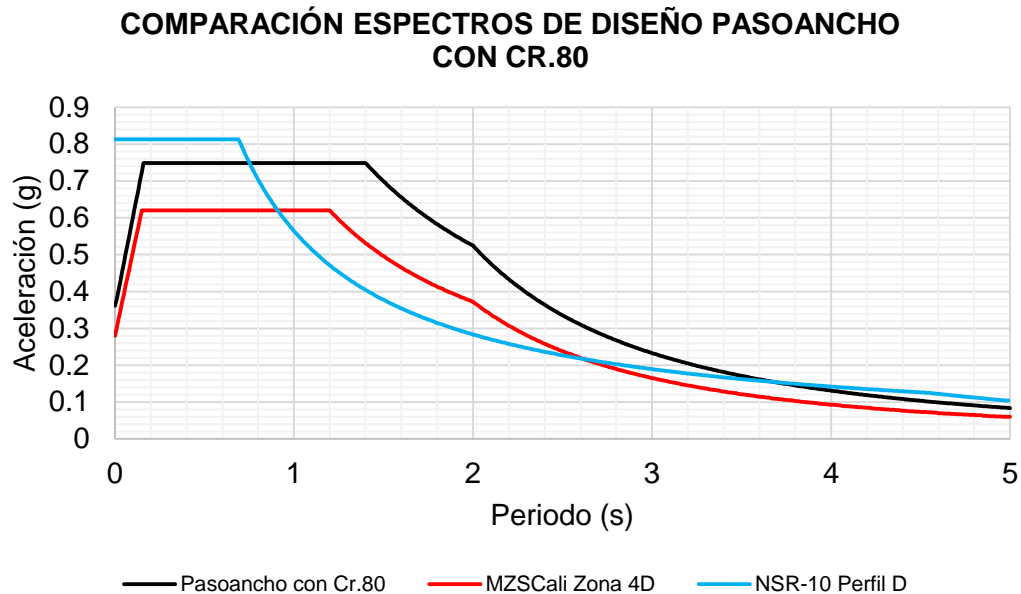
De acuerdo a la figura 25 se expone que para el perfil de Pasoancho con Cr.80 el valor máximo de la aceleración para es 0.75 g, que es muy similar al obtenido con el perfil de INGEOMINAS.

Figura 25 Espectros de diseño mediante EUA Pasoancho con Cr. 80



En la figura 26 se observa que al comparar los resultados de los espectros de diseño de la NSR-10, MZSCali (2005) y el calculado del perfil de Pasoancho con Cr.80 con los del perfil de INGEOMINAS tienen el mismo comportamiento. Pasoancho y MZSCali (2005) tienen la misma tendencia pero la aceleración es superior en Pasoancho hasta por un 21%. Respecto a la NSR-10 es inferior hasta el periodo de 0.77 s y a partir de este lo supera hasta por 0.34 g, sin embargo, inicia a disminuir desde 1.45 s.

Figura 26 Comparación de Espectro de diseño Pasoancho con Cr.80

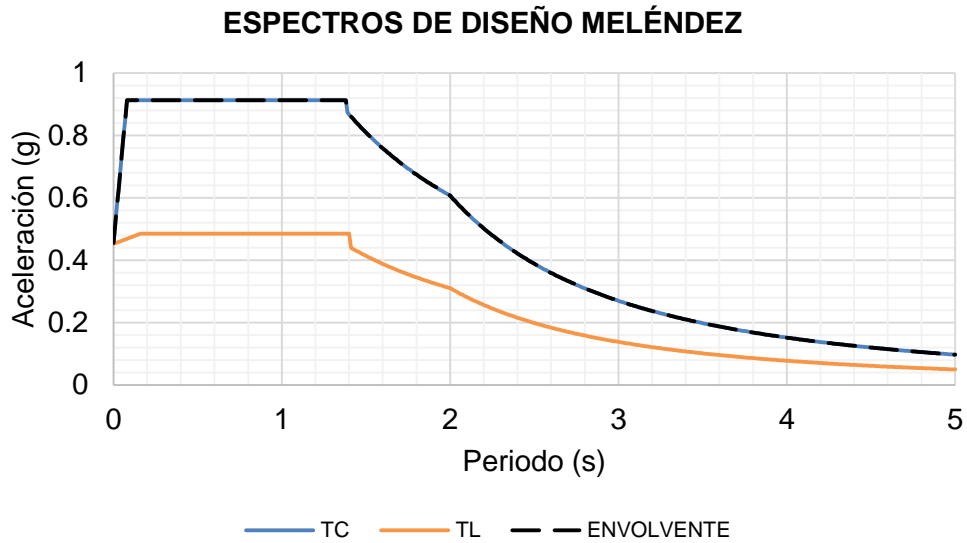


5.2.3. Zona 5

En la zona 5 se seleccionó el perfil de Meléndez por obtener un valor para FO de 0.13 con una profundidad de 18 m y Vs en roca de 900 m/s.

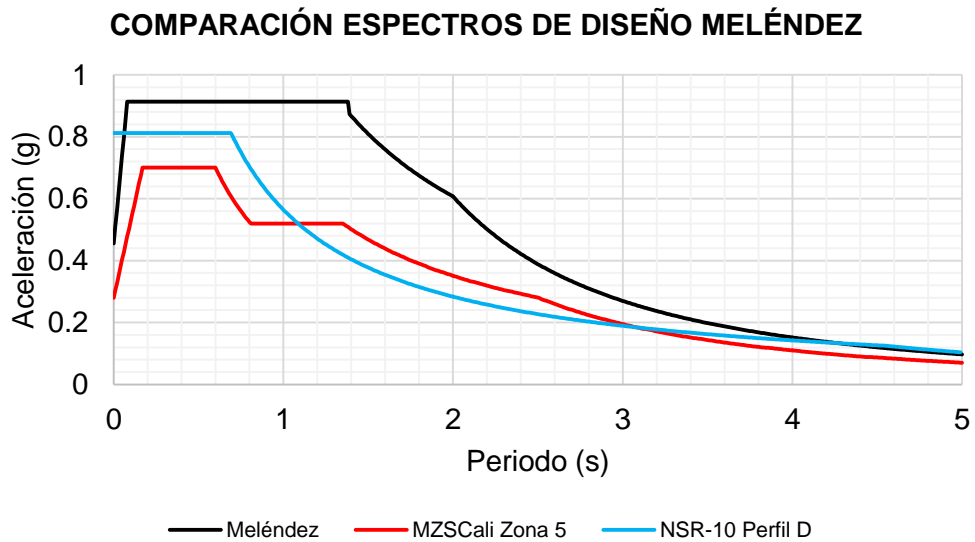
En la figura 27 se muestran los espectros de diseño para el perfil de Meléndez en el cual el valor máximo de la aceleración para es 0.91 g.

Figura 27 Espectros de diseño mediante EUA Meléndez



En la figura 28 se observa que al comparar los resultados de los espectros de diseño de la NSR-10, MZSCali (2005) y el calculado del perfil de Meléndez, en este último la aceleración es superior desde 0.09 a 4 s hasta por un 60% de la NSR-10 y 45% de MZSCali (2005).

Figura 28 Comparación de Espectro de diseño Meléndez

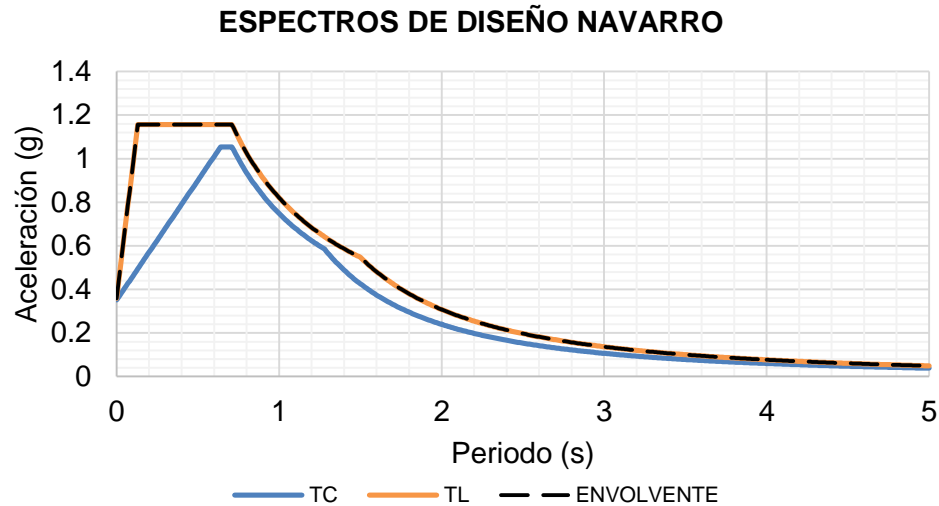


5.2.4. Zona 6

En la zona 6 se seleccionó el perfil de Navarro por obtener un valor para FO de 0.29 con una profundidad de 5.9 m y Vs en roca de 1000 m/s.

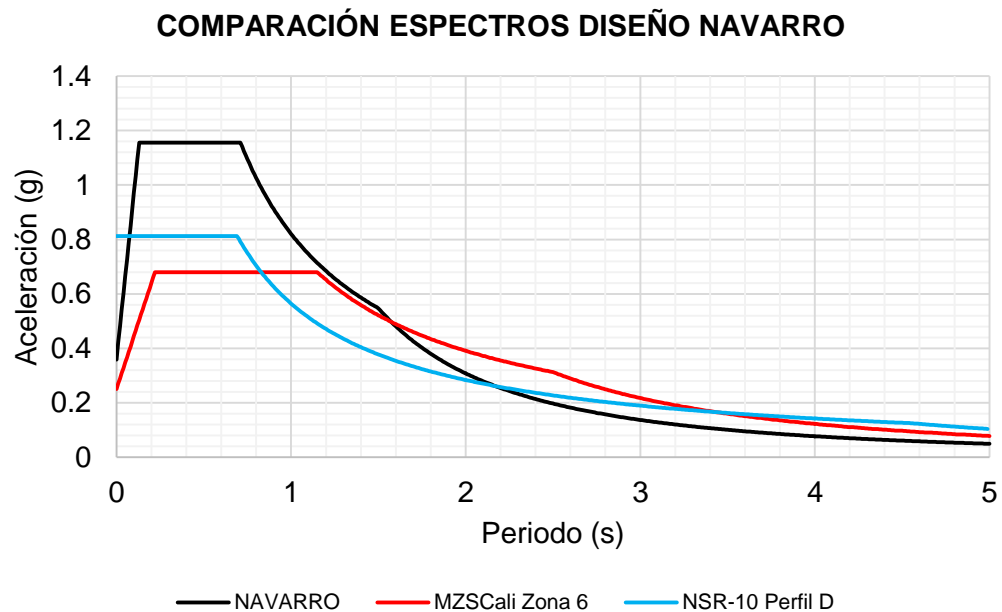
En la figura 29 se muestran los espectros de diseño para el perfil de Navarro en el cual el valor máximo de la aceleración para es 1.16 g.

Figura 29 Espectros de diseño mediante EUA Navarro



En la figura 30 se observa que el espectro de Navarro es superior a la NSR-10 y MZSCali (2005) en aceleración desde el periodo 0.09 a 1.55 s, sin embargo a partir de este disminuye hasta quedar por debajo de ambos espectros.

Figura 30 Comparación de Espectro de diseño Navarro



5.2.5. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

De acuerdo a los resultados obtenidos se muestra en la tabla 7 un resumen de las aceleraciones máximas y el periodo donde se obtienen para cada perfil seleccionado:

Tabla 7 Resumen de resultados de los espectros de diseño

	VELÓDROMO	MZSCALI ZONA 4C	NSR-10 PERFIL D	Profundidad (m)
Aceleración Máxima (g)	0.873	1	0.813	9.3
Periodo (s)	0<T<1.46	0<T<0.45	0<T<0.69	
	INGEOMINAS	MZSCALI ZONA 4D	NSR-10 PERFIL D	Profundidad (m)
Aceleración Máxima (g)	0.77	0.62	0.813	28.5
Periodo (s)	0<T<1.35	0<T<1.2	0<T<0.69	
	PASOANCHO CON CR. 80	MZSCALI ZONA 4D	NSR-10 PERFIL D	Profundidad (m)
Aceleración Máxima (g)	0.749	0.62	0.813	10.5
Periodo (s)	0<T<1.4	0<T<1.2	0<T<0.69	
	MELÉNDEZ	MZSCALI ZONA 5	NSR-10 PERFIL D	Profundidad (m)
Aceleración Máxima (g)	0.913	0.7	0.813	18
Periodo (s)	0<T<1.38	0<T<0.6	0<T<0.69	
	NAVARRO	MZSCALI ZONA 5	NSR-10 PERFIL D	Profundidad (m)
Aceleración Máxima (g)	1.156	0.68	0.813	5.9
Periodo (s)	0<T<0.71	0<T<1.15	0<T<0.69	

Según la tabla 7, se observa que el 60% de los espectros de diseño obtenidos son mayores a los calculados por la MZSCali y la NSR-10, también que al utilizar el espectro de la NSR-10 se generaliza las zonas y se puede presentar una sub-estimación de la respuesta sísmica como en los perfiles de INGEOMINAS y Pasoancho con Cr.80, o por el contrario obtener una predicción menor como en

Velódromo, Meléndez y Navarro, obteniendo una diferencia de demanda sísmica hasta de un 30% en el valor de la aceleración máxima y un 50% en el rango del periodo.

Por otro lado, se evidencia que en la elaboración del espectro de diseño por el método de EUA incide la selección de generalizar un valor de la aceleración en los rangos de periodo establecidos, ya que se puede sub-estimar la respuesta sísmica para determinados periodos. Igualmente, se observó que los espectros calculados eran superiores en su aceleración máxima en los periodos menores a 1 s.

Al igual que en la investigación de Montalva et al. (2011) se obtuvo que a mayor V_s el perfil de suelo tendrá menor amplificación, también se observó que para periodos altos la aceleración fue mayor que los expuestos en la MZSCali y la NSR-10, sin embargo, para periodos bajos se alcanzó resultados similares, logrando mejores predicciones de la amplificación profundidades menores a los 30 m.

6. CONCLUSIONES

En este capítulo se presentan las conclusiones del análisis de sensibilidad realizado para los ocho perfiles estratigráficos y la comparación de los espectros de diseño estimados según la NSR-10 y la MZSCali (2005) con los obtenidos de los cinco perfiles seleccionados de acuerdo al criterio de FO menor a 0.75.

En concordancia con Vergnaud (1973) se consideró significativo en la respuesta dinámica del suelo el espesor de un estrato blando cuando este determina la profundidad a la cual se encuentra la roca, como es el caso de los perfiles Canchas Panamericanas, Guadalupe y Floralia, puesto que según los resultados obtenidos parece incidir en su respuesta en superficie, ya que no se obtiene una buena correlación de FO y puede deberse al contenido de capas de suelo blando en los últimos estratos del perfil que influyen en la respuesta sísmica y al modificarlos cambia, demostrando la importancia de la precisión de las características de los suelos blandos, pues los suelos blandos generan mayores amplitudes del movimiento si es un suelo blando.

Igualmente, se observó que al asumir un rango de variación de la Vs en roca este influye en los resultados de la respuesta del suelo, por lo tanto, se puede concluir que las características de la roca son importantes en la modelación, debido a que se observó en los perfiles que dependiendo de está, FO podría aumentar o disminuir.

Los perfiles de INGEOMINAS y Pasoancho con Cr.80 están en la misma microzona, sin embargo, se obtienen distintas profundidades donde FO es mínimo, el primero en 28.5m y el segundo en 10.5m, lo anterior resalta los efectos de generalizar áreas pues un ensayo a 28.5m será más costoso y con posibles dificultades técnicas que uno a 10.5m, además de las posibles implicaciones en el diseño que puede repercutir, en la seguridad y costo de la edificación.

Como en la investigación de Montalva et al. (2011) se encontraron buenos resultados en la respuesta sísmica en profundidades más superficiales a los 30 metros, por ejemplo en Navarro con 9.5m, Meléndez 18m, Pasoancho con Cr.80 10.5m y Velódromo 9.3m, observando en los perfiles que las profundidades con mejores resultados se obtuvieron con las capas más superficiales lo que lleva a concluir que son estas las más influyentes en la respuesta sísmica de los suelos, lo cual concuerda con el comentario de Borchardt (1994) sobre las características de amplificación de los depósitos, que tienden a disminuir con la profundidad, por lo tanto una clasificación del sitio basado solo en los materiales cercanos a la superficie tenderá a estimar las características de amplificación, a excepción de cuando hay presencia de capas con material blando.

Según lo anterior se realiza la propuesta para las microzonas analizadas de utilizar las siguientes características geotécnicas: en la zona 4C profundidades de 10m y V_s en roca de 1600 m/s, zona 4D profundidades de 28.5m y V_s en roca de 700 m/s, zona 5 profundidades de 18m y V_s en roca de 900 m/s y zona 6 profundidades de 6m y V_s en roca de 1000 m/s, a excepción que encontrar presencia de material en las últimas capas de material blando.

Por otro lado, al comparar los espectros de diseño obtenidos con los calculados a partir de la NSR-10 y la MZSCali (2005) se evidencia que depende en gran medida en generalizar en los periodos la selección de los factores de EUA en superficie para la elaboración del espectro de diseño del perfil. Sin embargo, se observó que los espectros calculados eran superiores en su aceleración máxima en los periodos menores a 1 s.

De acuerdo a la evaluación realizada de variar la profundidad hasta la cual se determinan las propiedades geotécnicas del estrato de suelo se puede concluir que sí influye en su respuesta sísmica, como es el caso de los perfiles que contienen material blando en las últimas capas ya que no se obtienen buenos resultados de FO, que puede deberse a las características de amplificación que generan. Igualmente, se expone que las profundidades superficiales son más influyentes en la respuesta del suelo, por lo tanto, el planteamiento de Borchardt (1994) de utilizar V_{s30} en la clasificación de suelos es válido, sin embargo, al observar los espectros de diseño resultan más conservadores los obtenidos en el presente proyecto en la mayoría de los periodos.

Se recomienda la realización del estudio de la metodología planteada en el presente proyecto para diferentes sismos y así comparar tener un parámetro más de análisis en la respuesta sísmica en diferentes profundidades, y de acuerdo con la investigación de Vergnaud (1973), concluye que la onda de entrada puede ser un factor importante en el análisis de la sensibilidad de la respuesta dinámica del suelo, debido a que la onda sísmica cambia según los estratos por los que viaja y dependiendo de la ubicación de la estación en roca a la estación en suelo o del perfil de análisis el resultado puede variar, ya que es importante obtener datos precisos para su estudio.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aponte J. A. 2011. Trabajo de Grado: Evaluación de Métodos No Convencionales de Caracterización Geotécnica. Bogotá D.C., Colombia.

Arias, A. 1969. A measure of earthquake intensity in seismic design for nuclear power plants. Massachusetts Institute of Technology Press. Cambridge, MA, USA, pp. 438-483.

AIS Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. Reglamento colombiano de Construcción Sismo Resistente. NSR-10. Comisión asesora permanente para el régimen de construcciones sismo resistentes. Bogotá D.C., Colombia.

Bermúdez, M. L., Monsalve H., Cuenca J. C., Vargas C. A., Chávez-García F., y Ordaz M. 2001. Evaluación de efectos de sitios en Armenia (Colombia) utilizando vibración ambiental y ondas de coda. SGC – Bogotá. Informe Interno. 121 pp.

Bermúdez M. L., Franco L. E., Martínez S. E., SGC. Subdirección de Amenazas Geoambientales, 2002. Cálculo del período fundamental del suelo como herramienta para la microzonificación sísmica: casos colombianos.

Bermúdez M. L., Lozano C, y Ojeda A. 2009. Evaluación del perfil de velocidad para estratos de suelo blando por medio de funciones de transferencia. XII Congreso Colombiano de Geología, Paipa.

Bertero R., Verri A., Lehmann A., Mussat J. Criterios para construir el espectro de diseño elástico y seleccionar los sismos de diseño para un sitio dado.

Boore, D. M. 2004. Estimating V_{s30} (or NEHRP site classes) from shallow velocity models (Depths < 30 m), Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 94, pp. 591-597.

Borcherdt, R. D. 1994. Estimates of site-dependent response spectra for design (methodology and justification), Earthquake Spectra, Vol. 10, pp. 617-653.

Cadet, H., Duval A. M. 2009. A shear wave velocity study based on the Kik-net borehole data: A short note, Seismological Research Letters, Vol. 80, No. 3, pp. 440-445.

Carreño E., Bravo B., Suárez A., Tordesillas J. 1999. Registro y tratamiento de acelerogramas. Instituto geográfico Nacional. Física de la Tierra. 11:81-111.

Centro de Estudios sobre Desastres y Riesgos CEDERI. 2005. Microzonificación sísmica y estudios generales de riesgo sísmico para las ciudades de Palmira, Tuluá y Buga, 2003. Convenio CVC 091-2003 con los municipios de Palmira, Tuluá, Buga y la Universidad de Los Andes.

Chavéz-García F., Montalva G. 2014. Efectos de sitio para ingenieros geotécnicos, estudio del valle Parkway. Obras y Proyectos 16,6-30.

Crisafulli F., Villafane E. 2003. Guía de Estudio Espectros de respuesta y de diseño. Universidad Nacional de Cuyo Facultad de Ingeniería.

Dobry, R. 2010. Comunicación personal. Valentina Paz Peredo Andrade. Aplicación del método SASW en suelos Santiago de Chile.

Gallipoli M. R., Mucciarelli M. 2006. Comparison between V_{s30} and other estimates of site amplification in Italy first european conference on earthquake engineering and seismology (a joint event of the 13th ECEE & 30th general assembly of the esc). Geneva, Switzerland. Paper number: 270.

García C., Monsalve H., Peña D., Pareja M. 2015. Ajuste de curvas de degradación de módulo de cortante y relación de amortiguamiento para los suelos de cenizas: caso Armenia (Colombia). Centro de Estudios e Investigaciones de la Facultad de Ingeniería, Grupo Quimbaya, Universidad del Quindío.

Godoy C., González L., Sáez E. 2015. Importancia de la velocidad de onda de corte y del período predominante para la evaluación de la respuesta de sitio en Santiago. Obras y Proyectos 17, 61-67.

Grajales E. 2003. Comportamiento dinámico de los edificios provistos con dispositivos disipadores de energía.

IBC. 2006. International Building Code, International Code Council, Inc., Washington, D. C.

Kiban-Kyoshin, N. 2011. Database. Disponible en <http://www.kik.bosai.go.jp/>

Kramer S.L. 1996. Geotechnical Earthquake Engineering. University of Washington. Prentice-Hall International Series.

Lazcano S. 2012. Perfiles de velocidad de onda de corte y análisis del comportamiento sísmico del suelo en el poniente de Guadalajara, Jal.

Mantilla J. S., 2013. Manual de uso EFE-SIO. Universidad del Valle.

Milsom, J. 2003. Field Geophysics. Third Edition. University College London.

Montalva G.A., Soto F. y Rodriguez-Marek A. 2011. Propuesta de demanda sísmica continua para códigos: alejándonos de V_{s30} . Rev. Internacional de desastres naturales, Accidentes e Infraestructural Civil 12, 84-90.

Morales I. 2011. Factores de amplificación de ondas sísmicas en cenizas volcánicas. Pontificia Universidad Javeriana Bogotá, facultad de ingeniería, departamento de ingeniería civil.

Nakamura, Y. 1989. A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface, QR of RTRI 30, No. 1, February, 25-33.

Ojeda A., Bermúdez M. L. Respuesta Sísmica de Cali durante el sismo de Pizarro del 15 de Noviembre de 2004, $M_L=6,7$. Servicio Geológico Colombiano (SGC).

Ojeda A. 1999. Evaluación de efectos de sitio para la microzonificación sísmica de Pereira. INGEOMINAS.

Orosco L., Alfaro I. 2008. Potencial Destructivo de Sismos (Segunda Parte). Cuaderno de la Facultad n.3.

Pinilla C. 2012. Correlación entre el perfil de velocidad de propagación de ondas de corte y el espectro de respuesta en suelos. Universidad de Chile. Santiago de Chile.

Power M., Chiou B., Abrahamson N., Bozorgnia Y., Shantz T. 2008. An overview of the NGA Project. Earthquake Engineering Research Institute. Earthquake Spectra, Volume 24, No. 1, pages 3-21.

Rathje E.M., Abrahamson N.A., Bray J.D. 1998. Simplified frequency content estimates of earthquake ground motions, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 124, No. 2, pp. 150-159.

Rodríguez M. 2009. El aporte chileno a la sismología. BBC Mundo.

Salcedo E., Contreras S., Carreño E. 2009. El aporte chileno a la sismología, Margarita Rodríguez. BBC Mundo.

Schmidt V. 2008. Correlaciones a partir de la Intensidad de Arias para datos acelerográficos de Costa Rica. Revista Geológica de América Central, 38:95-117.

Schmidt V., Quirós C. 2008. Caracterización de los registros acelerográficos obtenidos en el laboratorio de Ingeniería Sísmica de la Universidad de Costa Rica. Ingeniería 17 (1): 17-41. San José, Costa Rica.

SGC y Universidad de los Andes. 1997. Microzonificación sísmica de Santa Fe de Bogotá. Bogotá, Colombia. 130 pp.

SGC. 2005. Subdirección de amenazas geológicas y entorno ambiental. Estudio de Microzonificación Sísmica de Santiago de Cali. Subproyecto de respuesta sísmica. Bogotá D.C., Colombia.

Travasarou T., Bray J., Abrahamson N. 2003. Empirical attenuation relationship for Arias Intensity. Earth. Eng. Struc. Dynam. 32(7): 1133-1155.

Vegnaud J.P. 1973. Primeras jornadas estructurales. Efecto de pequeños cambios en un depósito de suelo sobre sus características de respuesta sísmica.

ANEXO 1

Tabla 8 Valores de degradación del Módulo para materiales finos (Tabla 4.17, MZSCali, 2005)

			MODULO G/Go													
GRUPO	No	ID MUESTRA	0.0001	0.001	0.002	0.005	0.01	0.02	0.05	0.1	0.2	0.5	1	2	5	10
Finos de Alta Degradación	1	PVALL7	1	1.00	0.99	0.98	0.96	0.92	0.81	0.68	0.52	0.30	0.18	0.10	0.04	0.02
	2	HGARC5	1	0.99	0.99	0.96	0.93	0.87	0.73	0.57	0.40	0.21	0.12	0.06	0.03	0.01
	3	PTAR3	1	0.99	0.98	0.96	0.92	0.85	0.69	0.52	0.36	0.18	0.10	0.05	0.02	0.01
	4	PCR8022	1	0.99	0.99	0.97	0.94	0.89	0.77	0.63	0.46	0.25	0.14	0.08	0.03	0.02
	5	TNAPO3	1	0.99	0.98	0.96	0.92	0.86	0.71	0.55	0.38	0.19	0.11	0.06	0.02	0.01
	6	PCAÑA9	1	0.99	0.99	0.96	0.93	0.87	0.72	0.57	0.39	0.21	0.12	0.06	0.03	0.01
	7	VELOD3	1	1.00	0.99	0.98	0.96	0.91	0.81	0.68	0.51	0.30	0.17	0.10	0.04	0.02
	8	CAMAC25	1	0.99	0.99	0.97	0.93	0.88	0.74	0.58	0.41	0.22	0.12	0.07	0.03	0.01
	9	PCAÑA1	1	0.99	0.99	0.97	0.94	0.89	0.76	0.62	0.45	0.24	0.14	0.07	0.03	0.02
Finos de Moderada Degradación	1	VELOD8	1	1.00	0.99	0.97	0.95	0.90	0.79	0.65	0.48	0.27	0.16	0.09	0.04	0.02
	2	PCR803	1	1.00	0.99	0.97	0.95	0.91	0.79	0.66	0.49	0.28	0.16	0.09	0.04	0.02
	3	COMFA6	1	1.00	0.99	0.98	0.95	0.91	0.80	0.66	0.49	0.28	0.16	0.09	0.04	0.02
	4	CAMAC10	1	1.00	0.99	0.98	0.95	0.91	0.80	0.66	0.49	0.28	0.16	0.09	0.04	0.02
	5	INEM9	1	1.00	0.99	0.98	0.95	0.91	0.80	0.66	0.49	0.28	0.16	0.09	0.04	0.02
	6	PCR8011	1	1.00	0.99	0.98	0.95	0.91	0.81	0.67	0.51	0.29	0.17	0.09	0.04	0.02
	7	NAVAR5	1	0.99	0.99	0.97	0.95	0.90	0.78	0.64	0.47	0.26	0.15	0.08	0.03	0.02
	8	PVALL2	1	1.00	0.99	0.98	0.96	0.92	0.81	0.69	0.52	0.30	0.18	0.10	0.04	0.02
	9	FLOR4	1	1.00	0.99	0.98	0.95	0.91	0.80	0.67	0.50	0.29	0.17	0.09	0.04	0.02
	10	VIVER27	1	1.00	0.99	0.98	0.96	0.92	0.82	0.69	0.52	0.31	0.18	0.10	0.04	0.02
Finos de Baja Degradación	1	VIVER5	1	1.00	0.99	0.98	0.96	0.92	0.82	0.70	0.53	0.32	0.19	0.10	0.04	0.02
	2	PVSUR12	1	1.00	0.99	0.98	0.96	0.92	0.83	0.70	0.54	0.32	0.19	0.11	0.05	0.02
	3	VELOD33	1	1.00	0.99	0.98	0.96	0.92	0.82	0.70	0.54	0.32	0.19	0.10	0.05	0.02
	4	PILAR2	1	1.00	0.99	0.97	0.95	0.91	0.79	0.66	0.49	0.28	0.16	0.09	0.04	0.02
	5	ITOB115	1	1.00	0.99	0.98	0.97	0.93	0.85	0.74	0.58	0.36	0.22	0.12	0.05	0.03
	6	INEM32	1	1.00	0.99	0.98	0.96	0.93	0.84	0.73	0.58	0.35	0.21	0.12	0.05	0.03
	7	AGSUR10	1	1.00	0.99	0.98	0.97	0.93	0.85	0.73	0.58	0.35	0.21	0.12	0.05	0.03
	8	PALME13	1	1.00	0.99	0.98	0.97	0.94	0.86	0.76	0.61	0.38	0.24	0.13	0.06	0.03
	9	PVSUR25	1	1.00	0.99	0.98	0.97	0.94	0.86	0.76	0.61	0.38	0.24	0.13	0.06	0.03
	10	VELOD13	1	1.00	0.99	0.99	0.97	0.94	0.87	0.77	0.63	0.40	0.25	0.14	0.06	0.03
	11	DECEP2	1	1.00	0.99	0.99	0.97	0.94	0.86	0.76	0.61	0.39	0.24	0.14	0.06	0.03
Finos de Muy Baja Degradación	1	TNAPO9	1	1.00	0.99	0.99	0.97	0.95	0.88	0.78	0.64	0.42	0.26	0.15	0.07	0.03
	2	PALME5	1	1.00	1.00	0.99	0.97	0.95	0.88	0.79	0.66	0.43	0.28	0.16	0.07	0.04
	3	PALME80	1	1.00	1.00	0.99	0.98	0.96	0.90	0.81	0.69	0.47	0.31	0.18	0.08	0.04
	4	ITOB15	1	1.00	1.00	0.99	0.98	0.96	0.91	0.83	0.71	0.49	0.32	0.19	0.09	0.05
	5	PALME31	1	1.00	1.00	0.99	0.98	0.96	0.92	0.84	0.73	0.52	0.35	0.21	0.10	0.05
	6	PALME44	1	1.00	1.00	0.99	0.98	0.97	0.92	0.86	0.75	0.54	0.37	0.23	0.11	0.06
	7	PALME73	1	1.00	1.00	1.00	0.99	0.98	0.95	0.91	0.84	0.68	0.51	0.34	0.17	0.09
	8	ITOB110	1	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.97	0.94	0.89	0.76	0.62	0.44	0.24	0.14
	9	GUADA18	1	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.97	0.94	0.89	0.76	0.61	0.44	0.24	0.14
	10	GUADA18	1	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.97	0.94	0.89	0.76	0.62	0.45	0.25	0.14
	11	ITOB124	1	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.98	0.96	0.93	0.84	0.73	0.57	0.35

Tabla 9 Valores de Amortiguamiento para materiales finos (Tabla 4.18, MZSCali, 2005)

			AMORTIGUAMIENTO - D (%)													
GRUPO	No	ID MUESTRA	0.0001	0.001	0.002	0.005	0.01	0.02	0.05	0.1	0.2	0.5	1	2	5	10
Finos de Alta Degradación	1	PVALL7	0.40	0.40	0.40	0.43	0.59	0.97	2.03	3.55	5.83	9.46	11.87	13.60	14.92	15.43
	2	HGARC5	0.46	0.46	0.46	0.54	0.79	1.37	3.01	5.04	7.53	10.66	12.41	13.55	14.37	14.67
	3	PTAR3	0.30	0.30	0.30	0.30	0.32	0.45	1.03	2.12	3.84	6.36	7.84	8.80	9.48	9.73
	4	PCR8022	0.22	0.17	0.14	0.11	0.12	0.21	0.63	1.35	2.39	3.86	4.71	5.28	5.68	5.84
	5	TNAPO3	0.52	0.46	0.43	0.44	0.57	0.96	2.37	4.38	6.94	10.06	11.71	12.75	13.46	13.72
	6	PCANA9	0.60	0.60	0.60	0.60	0.71	1.11	2.77	5.43	9.11	13.85	16.42	18.03	19.16	19.56
	7	VELOD3	0.52	0.52	0.52	0.52	0.56	0.86	2.27	4.75	8.38	13.31	16.07	17.83	19.06	19.52
	8	CAMAC25	0.41	0.33	0.28	0.22	0.21	0.32	0.97	2.22	4.18	6.99	8.61	9.67	10.42	10.70
	9	PCANA1	0.18	0.18	0.18	0.18	0.20	0.29	0.71	1.43	2.51	3.99	4.82	5.35	5.72	5.86
Finos de Moderada Degradación	1	VELOD8	0.59	0.59	0.59	0.59	0.63	0.87	2.06	4.27	7.74	12.79	15.73	17.63	18.98	19.47
	2	PCR803	0.47	0.48	0.48	0.50	0.53	0.60	0.80	1.13	1.79	3.47	5.40	7.49	9.69	10.72
	3	COMFA6	0.38	0.36	0.36	0.36	0.40	0.53	1.10	2.12	3.75	6.24	7.75	8.75	9.46	9.72
	4	CAMAC10	1.07	1.00	0.96	0.92	0.98	1.27	2.67	5.35	9.83	16.91	21.31	24.26	26.37	27.16
	5	INEM9	0.19	0.18	0.18	0.18	0.20	0.27	0.55	1.04	1.85	3.09	3.85	4.36	4.72	4.86
	6	PCR8011	0.31	0.29	0.28	0.27	0.29	0.38	0.77	1.51	2.76	4.77	6.04	6.90	7.52	7.75
	7	NAVAR5	1.08	1.08	1.08	1.08	1.19	1.56	3.13	6.00	10.74	18.21	22.87	26.01	28.27	29.10
	8	PVALL2	0.67	0.67	0.67	0.70	0.78	1.03	1.99	3.69	6.47	10.89	13.68	15.58	16.95	17.45
	9	FLOR4	0.69	0.67	0.67	0.69	0.77	1.01	1.95	3.63	6.41	10.84	13.65	15.55	16.94	17.45
	10	VIVER27	0.43	0.43	0.43	0.43	0.45	0.56	1.11	2.21	4.17	7.45	9.60	11.08	12.16	12.56
Finos de Baja Degradación	1	VIVER5	0.23	0.23	0.23	0.24	0.26	0.33	0.61	1.11	1.97	3.43	4.41	5.09	5.60	5.79
	2	PVSUR12	0.90	0.90	0.90	0.91	1.00	1.26	2.32	4.27	7.67	13.53	17.50	20.29	22.37	23.15
	3	VELOD33	1.34	1.34	1.34	1.37	1.49	2.05	4.59	7.80	12.00	17.73	21.08	23.28	24.84	25.41
	4	PILAR2	0.65	0.61	0.59	0.57	0.61	0.81	1.69	3.35	6.10	10.39	13.02	14.78	16.04	16.50
	5	ITOB115	0.93	0.91	0.91	0.93	1.02	1.28	2.28	4.11	7.36	13.13	17.17	20.07	22.26	23.10
	6	INEM32	0.37	0.32	0.28	0.23	0.22	0.69	1.56	2.69	4.24	6.48	7.87	8.81	9.49	9.74
	7	AGSUR10	0.58	0.58	0.58	0.61	0.66	0.82	1.37	2.37	4.19	7.64	10.25	12.22	13.75	14.35
	8	PALME13	1.29	1.30	1.32	1.39	1.53	1.84	2.85	4.62	7.91	14.80	20.65	25.50	29.54	31.17
	9	PVSUR25	0.69	0.69	0.69	0.72	0.78	0.95	1.60	2.79	4.95	9.10	12.24	14.63	16.49	17.21
	10	VELOD13	0.58	0.58	0.59	0.61	0.67	0.82	1.34	2.27	3.99	7.36	9.99	12.04	13.66	14.30
	11	DECEP2	0.58	0.58	0.59	0.61	0.67	0.82	1.34	2.28	4.01	7.39	10.02	12.06	13.67	14.30
Finos de Muy Baja Degradación	1	TNAPO9	0.31	0.31	0.32	0.34	0.37	0.44	0.69	1.13	1.95	3.64	5.06	6.22	7.18	7.57
	2	PALME5	0.82	0.83	0.85	0.90	1.00	1.19	1.83	2.91	4.90	9.15	12.86	16.01	18.68	19.77
	3	PALME80	0.51	0.52	0.53	0.56	0.61	0.72	1.08	1.68	2.80	5.30	7.60	9.62	11.41	12.15
	4	ITOB15	0.39	0.40	0.41	0.43	0.47	0.55	0.80	1.23	2.03	3.85	5.60	7.21	8.66	9.28
	5	PALME31	0.47	0.48	0.49	0.51	0.56	0.65	0.92	1.38	2.27	4.34	6.42	8.40	10.25	11.06
	6	PALME44	0.63	0.64	0.65	0.68	0.73	0.85	1.18	1.75	2.83	5.46	8.18	10.88	13.48	14.63
	7	PALME73	0.70	0.71	0.72	0.74	0.78	0.85	1.06	1.43	2.15	4.15	6.70	9.82	13.55	15.47
	8	ITOB110	0.31	0.31	0.32	0.32	0.33	0.35	0.42	0.52	0.72	1.33	2.20	3.46	5.28	6.37
	9	GUADA18	1.17	1.18	1.19	1.21	1.25	1.33	1.56	1.94	2.72	4.98	8.25	12.96	19.78	23.88
	10	GUADA18	0.47	0.47	0.47	0.48	0.50	0.53	0.62	0.78	1.09	1.99	3.30	5.18	7.91	9.55
	11	ITOB124	0.27	0.27	0.28	0.28	0.28	0.29	0.32	0.38	0.48	0.78	1.27	2.10	3.64	4.81

Tabla 10 Valores de degradación del Módulo para materiales granulares (Tabla 4.19, MZSCali, 2005)

			MODULO G/Go												
GRUPO	No	ID MUESTRA	0.0001	0.001	0.002	0.005	0.01	0.02	0.05	0.1	0.2	0.5	1	2	5
Arena gravosa	1	NAVAR13A	1.00	0.98	0.96	0.91	0.83	0.71	0.49	0.33	0.19	0.09	0.05	0.02	0.01
	2	NAVAR12A	1.00	0.98	0.97	0.92	0.86	0.75	0.55	0.38	0.23	0.11	0.06	0.03	0.01
	3	NAVAR10A	1.00	0.99	0.98	0.94	0.89	0.80	0.61	0.44	0.28	0.14	0.07	0.04	0.02
Arena media	1	PVALL3	1.00	0.99	0.97	0.93	0.87	0.77	0.57	0.40	0.25	0.12	0.06	0.03	0.01
	2	PMALL5	1.00	0.99	0.98	0.96	0.92	0.85	0.70	0.53	0.36	0.19	0.10	0.05	0.02
	3	PILAR9	1.00	1.00	0.99	0.98	0.95	0.91	0.80	0.67	0.50	0.29	0.17	0.09	0.04
	4	COMFA11	1.00	0.99	0.98	0.96	0.92	0.85	0.70	0.54	0.37	0.19	0.10	0.06	0.02
	5	INEM20	1.00	0.99	0.98	0.96	0.93	0.86	0.71	0.55	0.38	0.20	0.11	0.06	0.02
	6	DECEP9	1.00	0.99	0.99	0.97	0.94	0.88	0.75	0.61	0.43	0.23	0.13	0.07	0.03
	7	PTAR15	1.00	0.99	0.98	0.96	0.92	0.86	0.71	0.55	0.38	0.19	0.11	0.06	0.02
	8	PILAR17	1.00	1.00	0.99	0.98	0.95	0.91	0.81	0.68	0.51	0.30	0.17	0.10	0.04
	9	PMALL9	1.00	1.00	0.99	0.97	0.95	0.91	0.79	0.66	0.49	0.28	0.16	0.09	0.04
	10	COMFA18	1.00	1.00	0.99	0.98	0.96	0.91	0.81	0.68	0.52	0.30	0.18	0.10	0.04
	11	PTAR31	1.00	1.00	0.99	0.98	0.97	0.94	0.86	0.75	0.60	0.38	0.23	0.13	0.06
	12	INEM38	1.00	1.00	0.99	0.98	0.96	0.93	0.84	0.72	0.57	0.34	0.21	0.12	0.05
	13	PCR8029	1.00	1.00	0.99	0.98	0.96	0.93	0.83	0.71	0.55	0.33	0.20	0.11	0.05
Arena fina	1	NAVAR6	1.00	0.99	0.98	0.96	0.92	0.84	0.68	0.52	0.35	0.18	0.10	0.05	0.02
	2	DECEP6	1.00	0.99	0.98	0.96	0.92	0.86	0.71	0.55	0.38	0.19	0.11	0.06	0.02
	3	FLOR8	1.00	0.99	0.99	0.97	0.93	0.87	0.74	0.58	0.41	0.22	0.12	0.07	0.03
	4	MELEN5	1.00	0.99	0.99	0.97	0.93	0.87	0.73	0.58	0.41	0.22	0.12	0.06	0.03
	5	HGARC18	1.00	1.00	0.99	0.98	0.95	0.91	0.79	0.66	0.49	0.28	0.16	0.09	0.04
	6	COMFA14	1.00	0.99	0.99	0.97	0.94	0.89	0.75	0.61	0.43	0.24	0.13	0.07	0.03
	7	AGSUR19	1.00	1.00	0.99	0.98	0.95	0.91	0.80	0.67	0.50	0.29	0.17	0.09	0.04
	8	MELEN21	1.00	0.99	0.99	0.97	0.95	0.90	0.78	0.63	0.46	0.26	0.15	0.08	0.03
	9	GUADA24A	1.00	1.00	0.99	0.98	0.96	0.92	0.81	0.69	0.52	0.30	0.18	0.10	0.04
	10	FLOR16	1.00	0.99	0.99	0.97	0.95	0.90	0.78	0.64	0.47	0.26	0.15	0.08	0.03
	11	PILAR25	1.00	1.00	0.99	0.98	0.96	0.92	0.83	0.70	0.54	0.32	0.19	0.11	0.05
Arena limo arcillosa	1	MELEN18	1.00	1.00	0.99	0.98	0.96	0.92	0.83	0.70	0.54	0.32	0.19	0.11	0.05
	2	FLOR18	1.00	1.00	0.99	0.98	0.97	0.94	0.86	0.76	0.61	0.39	0.24	0.14	0.06
	3	INGEO19	1.00	1.00	0.99	0.98	0.95	0.91	0.80	0.67	0.50	0.29	0.17	0.09	0.04
	4	PANAM40	1.00	1.00	0.99	0.98	0.96	0.92	0.83	0.70	0.54	0.32	0.19	0.11	0.05
	5	INGEO26	1.00	1.00	0.99	0.98	0.96	0.92	0.82	0.70	0.54	0.32	0.19	0.10	0.05
	6	PVSUR20	1.00	1.00	0.99	0.97	0.95	0.90	0.78	0.65	0.48	0.27	0.15	0.08	0.04
	7	FLOR5	1.00	0.99	0.99	0.96	0.93	0.87	0.72	0.57	0.40	0.21	0.12	0.06	0.03
	8	PANAM41	1.00	1.00	0.99	0.98	0.96	0.92	0.82	0.70	0.54	0.32	0.19	0.10	0.05
	9	PANAM55	1.00	1.00	0.99	0.98	0.97	0.93	0.85	0.74	0.58	0.36	0.22	0.12	0.05
	10	VIVER19	1.00	1.00	0.99	0.98	0.96	0.93	0.84	0.72	0.56	0.34	0.20	0.11	0.05

Tabla 11 Valores de Amortiguamiento para materiales granulares (Tabla 4.20, MZSCali, 2005)

			AMORTIGUAMIENTO - D (%)												
GRUPO	No	ID MUESTRA	0.0001	0.001	0.002	0.005	0.01	0.02	0.05	0.1	0.2	0.5	1	2	5
Arena gravosa	1	NAVAR13A	1.20	1.20	1.35	2.44	4.47	7.63	13.24	17.54	20.95	23.71	24.80	25.39	25.75
	2	NAVAR12A	1.20	1.20	1.22	2.05	3.80	6.67	12.16	16.77	20.69	24.06	25.45	26.20	26.67
	3	NAVAR10A	1.20	1.20	1.20	1.68	3.18	5.71	10.93	15.72	20.14	24.22	25.97	26.95	27.57
Arena media	1	PVALL3	0.63	0.67	0.80	1.26	1.98	3.12	5.25	7.31	9.67	12.65	14.36	15.50	16.34
	2	PMALL5	0.59	0.59	0.67	1.02	1.58	2.47	4.20	6.01	8.22	11.24	13.07	14.32	15.25
	3	PILAR9	0.80	0.76	0.86	1.26	1.92	2.98	5.10	7.43	10.44	14.78	17.50	19.41	20.84
	4	COMFA11	0.93	0.93	1.04	1.52	2.32	3.60	6.16	9.00	12.70	18.04	21.41	23.78	25.56
	5	INEM20	0.54	0.52	0.58	0.84	1.29	2.00	3.42	4.99	7.05	10.02	11.89	13.21	14.20
	6	DECEP9	0.78	0.80	0.81	0.86	0.94	1.10	1.61	2.45	4.05	7.70	11.20	14.41	17.33
	7	PTAR15	0.68	0.68	0.73	1.01	1.50	2.30	3.96	5.94	8.74	13.11	16.00	18.09	19.69
	8	PILAR17	0.82	0.71	0.74	0.98	1.43	2.17	3.75	5.74	8.73	13.64	17.02	19.49	21.41
	9	PMALL9	0.55	0.55	0.58	0.76	1.11	1.68	2.89	4.44	6.77	10.62	13.28	15.23	16.74
	10	COMFA18	0.59	0.59	0.61	0.78	1.11	1.66	2.87	4.48	7.01	11.35	14.42	16.71	18.50
	11	PTAR31	0.90	0.91	0.93	0.98	1.06	1.22	1.70	2.51	4.07	7.84	11.77	15.64	19.38
	12	INEM38	0.78	0.63	0.63	0.78	1.09	1.61	2.78	4.42	7.13	11.96	15.48	18.14	20.24
	13	PCR8029	0.70	0.56	0.55	0.66	0.92	1.34	2.32	3.73	6.13	10.56	13.84	16.34	18.32
Arena fina	1	NAVAR6	1.04	1.11	1.33	2.11	3.33	5.25	8.80	12.23	16.10	20.96	23.74	25.59	26.94
	2	DECEP6	0.81	0.85	1.01	1.57	2.47	3.89	6.56	9.19	12.23	16.16	18.45	19.98	21.11
	3	FLOR8	0.91	0.87	0.97	1.43	2.18	3.39	5.80	8.44	11.87	16.80	19.89	22.06	23.68
	4	MELEN5	0.89	0.85	0.94	1.37	2.09	3.25	5.57	8.13	11.48	16.34	19.41	21.56	23.19
	5	HGARC18	0.50	0.50	0.54	0.73	1.07	1.63	2.81	4.26	6.37	9.74	12.02	13.67	14.95
	6	COMFA14	0.57	0.57	0.60	0.82	1.20	1.83	3.16	4.79	7.16	10.96	13.52	15.38	16.82
	7	AGSUR19	0.58	0.58	0.61	0.81	1.17	1.78	3.07	4.70	7.17	11.23	14.03	16.08	17.68
	8	MELEN21	1.07	0.92	0.95	1.26	1.83	2.76	4.77	7.33	11.22	17.64	22.08	25.35	27.89
	9	GUADA24A	0.64	0.54	0.55	0.72	1.03	1.54	2.67	4.14	6.43	10.33	13.06	15.09	16.68
	10	FLOR16	0.82	0.69	0.71	0.91	1.31	1.97	3.40	5.28	8.21	13.18	16.68	19.28	21.31
	11	PILAR25	0.75	0.62	0.64	0.82	1.17	1.75	3.03	4.72	7.38	11.94	15.16	17.56	19.43
Arena limo arcillosa	1	MELEN18	0.57	0.47	0.48	0.62	0.88	1.32	2.29	3.57	5.59	9.07	11.53	13.36	14.80
	2	FLOR18	0.64	0.52	0.51	0.64	0.89	1.32	2.28	3.62	5.84	9.79	12.67	14.84	16.56
	3	INGEO19	0.62	0.62	0.64	0.86	1.25	1.89	3.27	5.00	7.61	11.87	14.80	16.95	18.62
	4	PANAM40	0.39	0.39	0.40	0.51	0.73	1.10	1.89	2.95	4.60	7.42	9.40	10.88	12.04
	5	INGEO26	0.59	0.59	0.61	0.78	1.11	1.66	2.87	4.48	7.01	11.35	14.43	16.71	18.51
	6	PVSUR20	0.97	0.97	1.09	1.59	2.42	3.76	6.44	9.39	13.23	18.76	22.24	24.68	26.52
	7	FLOR5	0.94	0.89	0.98	1.42	2.15	3.34	5.72	8.40	11.95	17.15	20.46	22.80	24.57
	8	PANAM41	0.50	0.50	0.50	0.63	0.89	1.33	2.30	3.61	5.74	9.45	12.11	14.11	15.68
	9	PANAM55	0.44	0.44	0.44	0.55	0.77	1.15	1.98	3.13	4.99	8.28	10.64	12.42	13.82
	10	VIVER19	0.23	0.23	0.23	0.28	0.39	0.58	1.01	1.60	2.58	4.34	5.62	6.59	7.36

ANEXO 2

Figura 31 Registro acelerográfico CCAL5

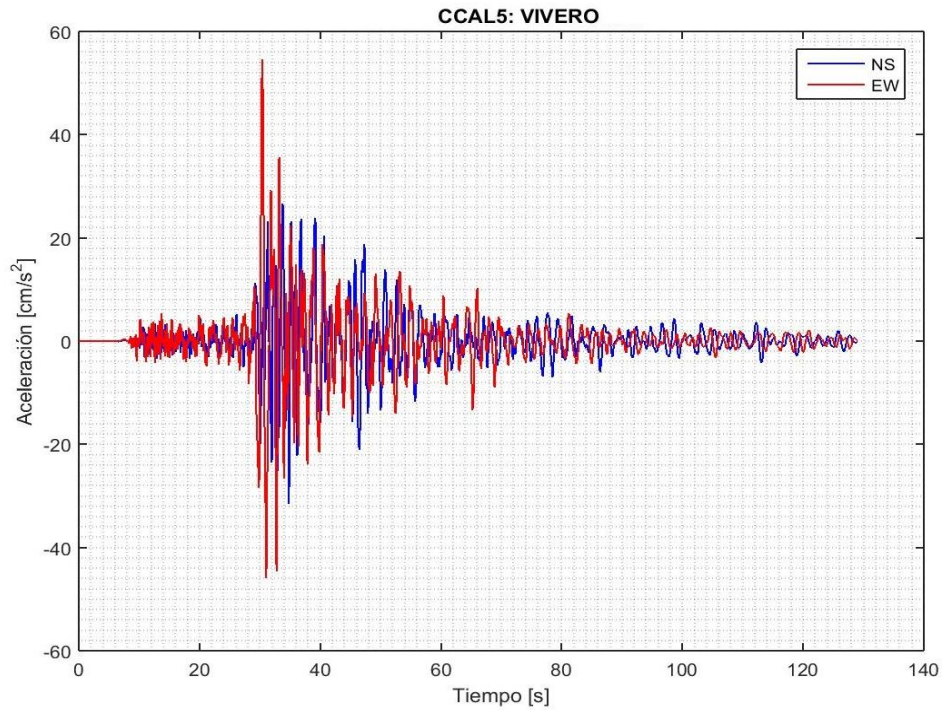


Figura 32 Registro acelerográfico RAC02

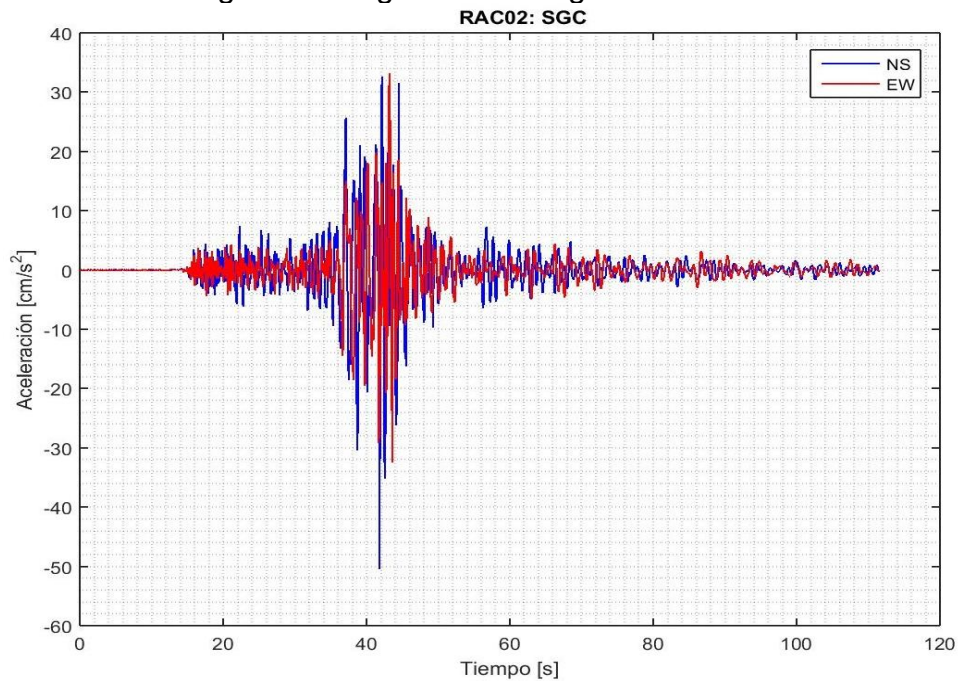


Figura 33 Registro acelerográfico RAC03

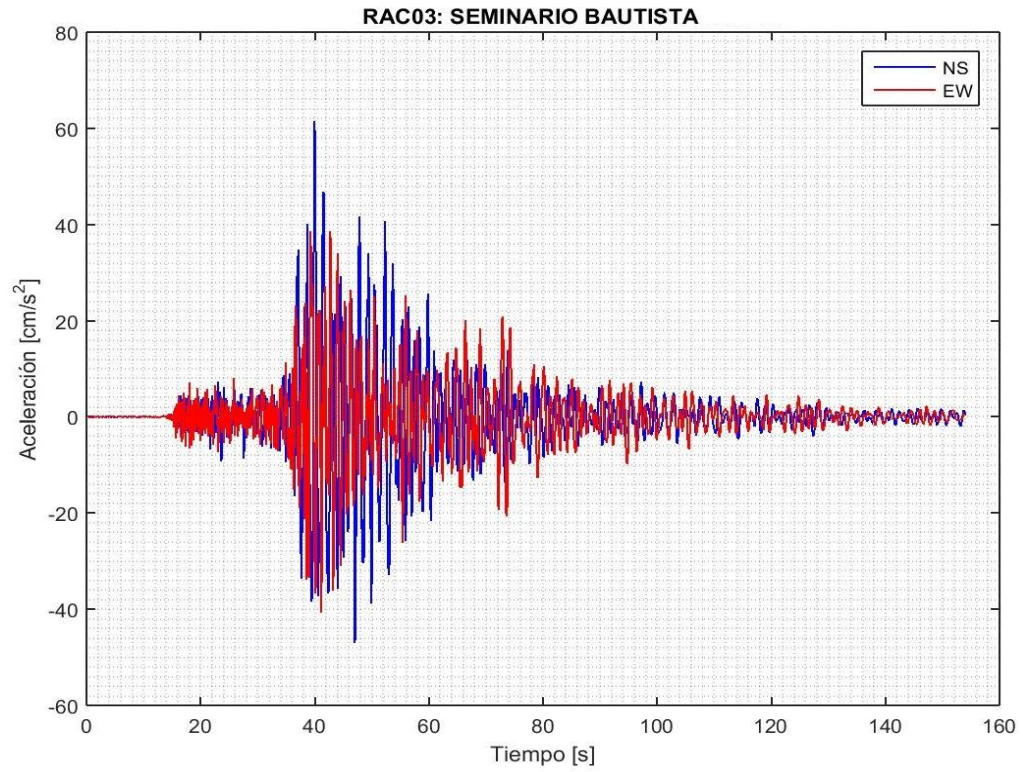


Figura 34 Registro acelerográfico RAC04

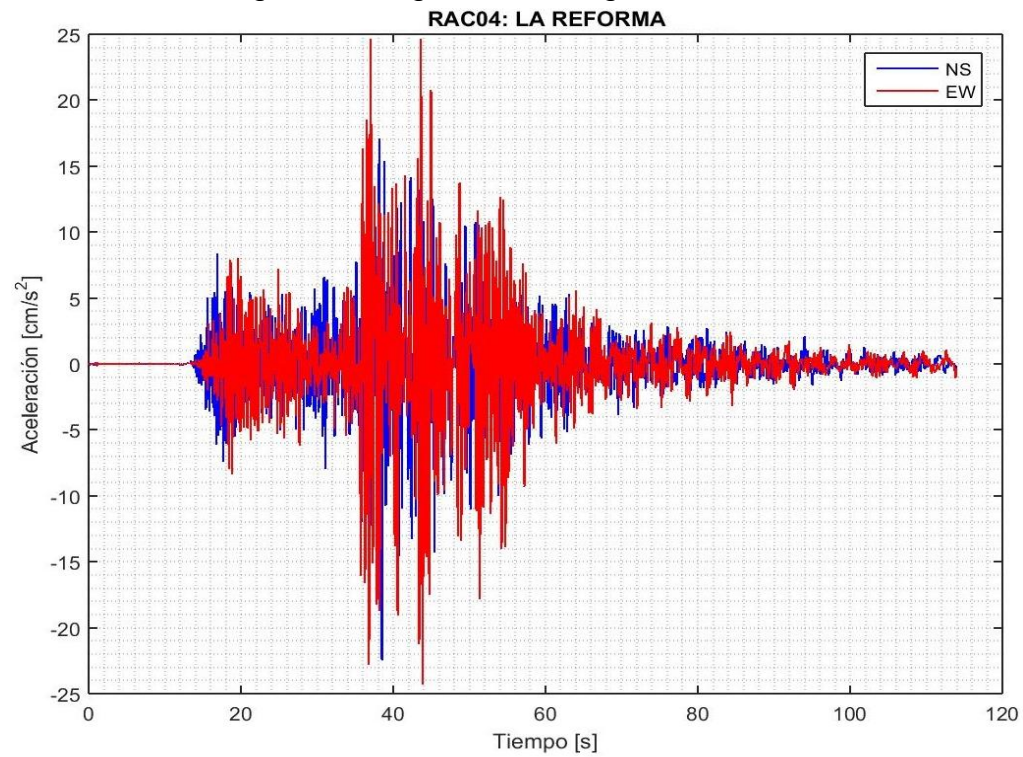


Figura 35 Registro acelerográfico RAC06

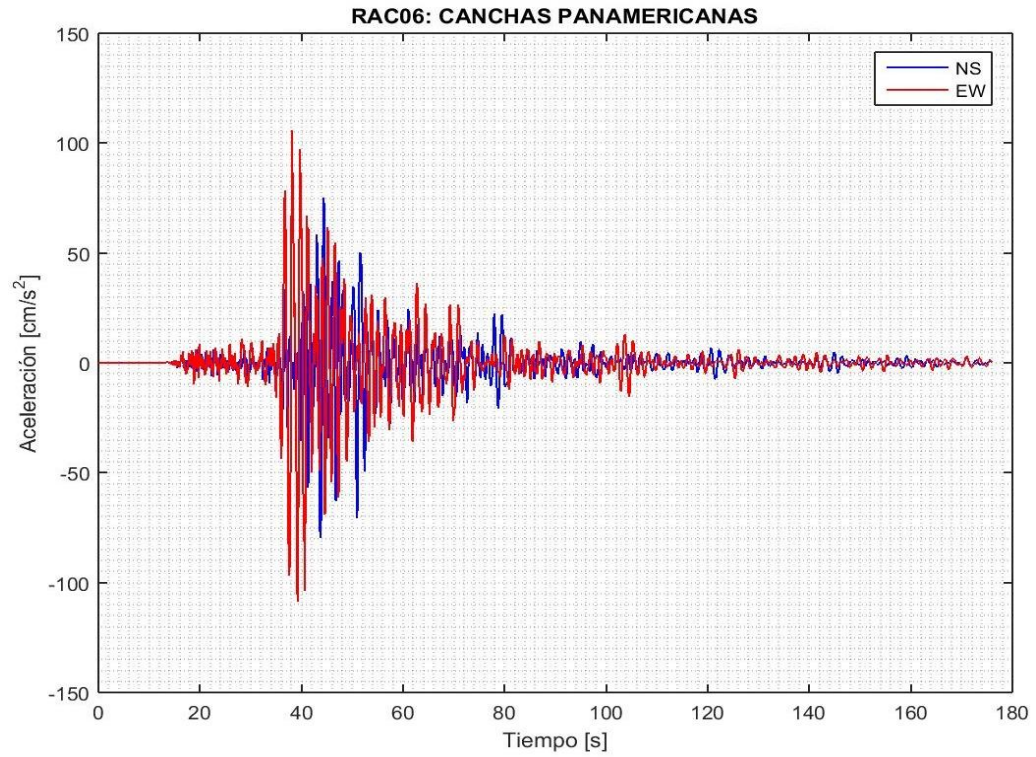


Figura 36 Registro acelerográfico RAC08

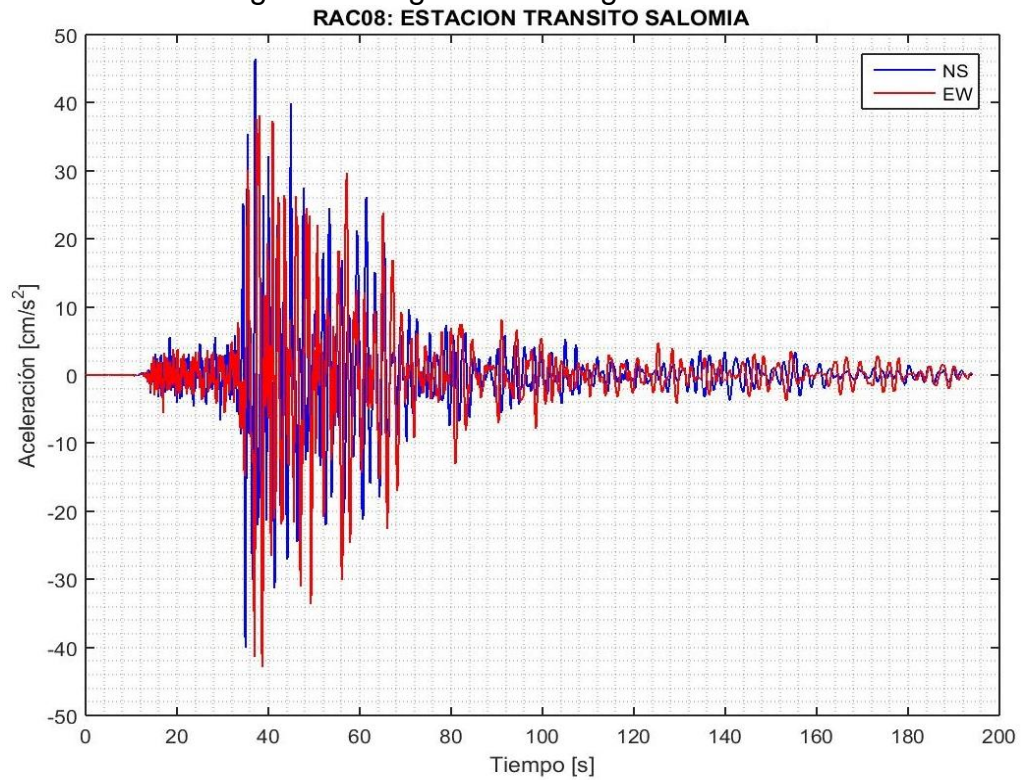


Figura 37 Registro acelerográfico RAC10

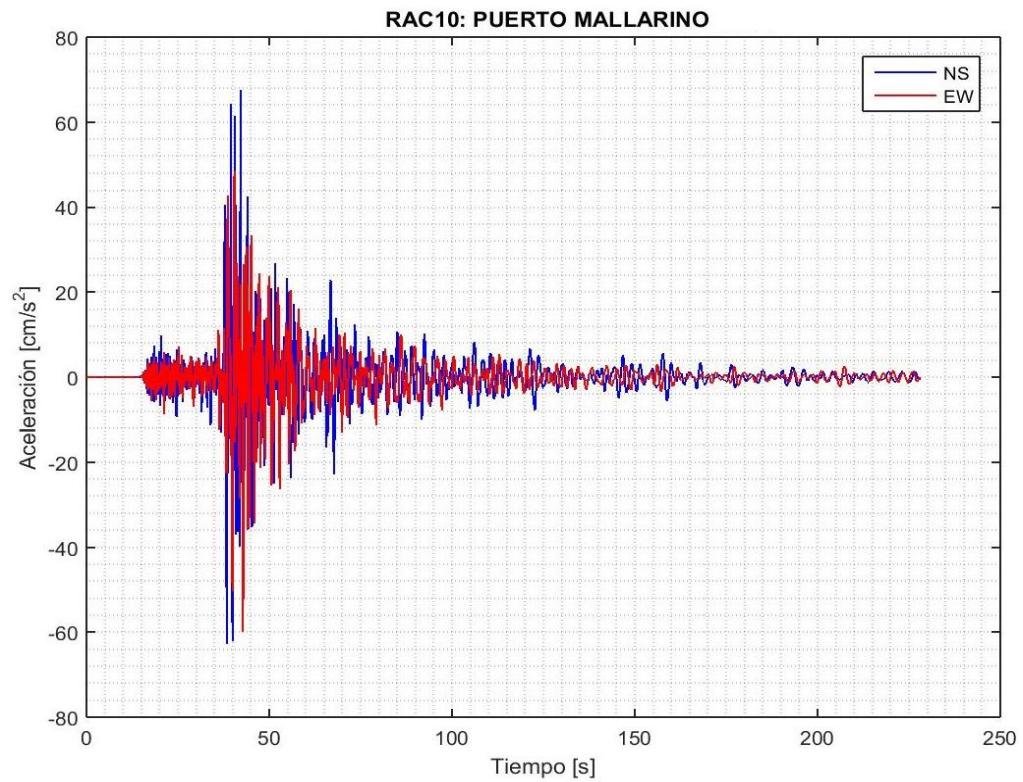
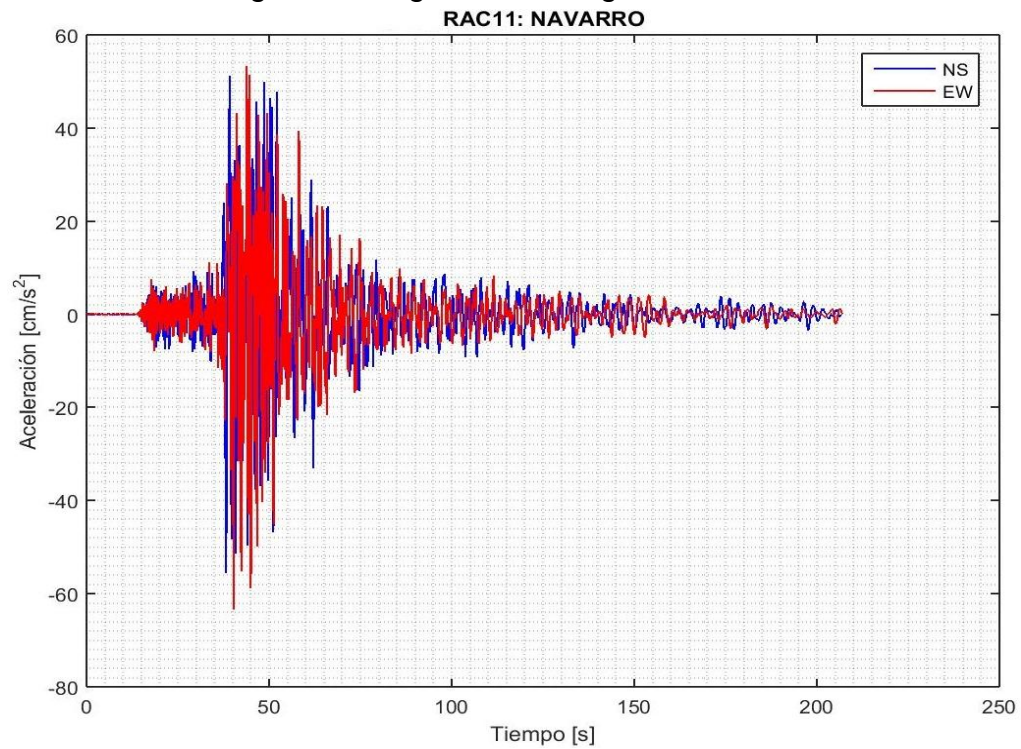


Figura 38 Registro acelerográfico RAC11



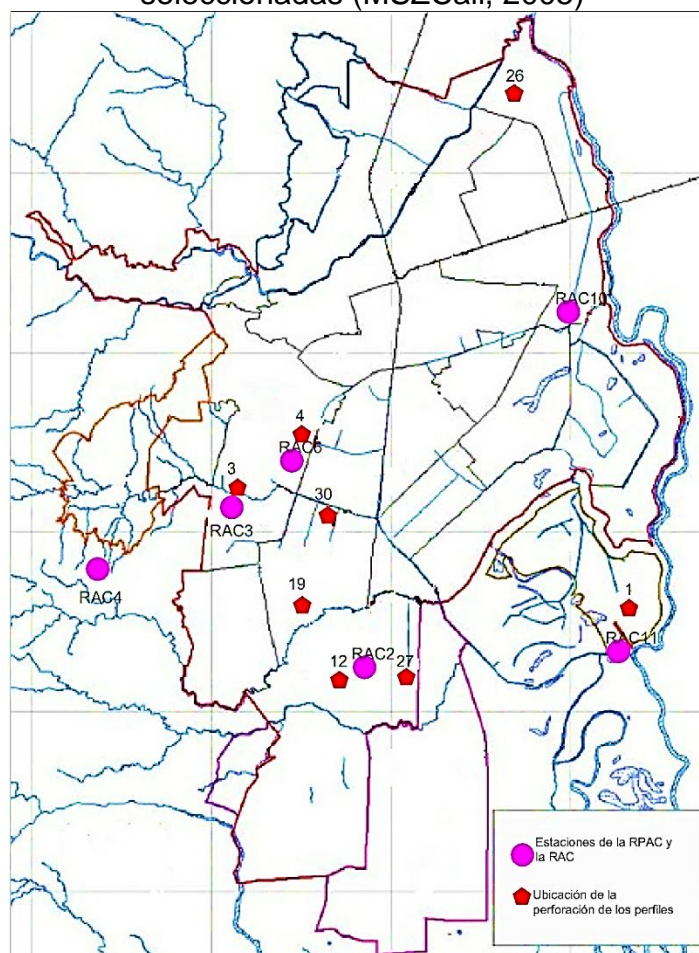
ANEXO 3

Tabla 12 Selección de los perfiles estratigráficos

No	Código	RAC	Período (s) MZSCali	Ensayo de Down Hole	Se registró el Sismo de Pizarro	Período sismo Pizarro	Contiene otro perfil en la misma microzona	Cumple para análisis
1	NAVAR	RAC11	2	SI	SI	2	SI	SI
2	NAVAR	RAC11	1.9	SI	SI	2	NO	NO
3	VELOD	RAC03	1.3	SI	SI	1.2	SI	SI
4	PANAM	RAC06	1.5	SI	SI	1.5	SI	SI
5	HGARC	RAC12	1.8	SI	NO	-	NO	NO
6	PCAÑA	RAC01	1.6	NO	NO	-	NO	NO
7	PAMOR	RAC09	1.5	SI	NO	-	NO	NO
8	PVSUR	RAC12	1.7	SI	NO	-	NO	NO
9	UAUTO	RAC01	0.8	NO	NO	-	NO	NO
10	PMALL	RAC10	1.7	SI	SI	2	NO	NO
11	PVALL	RAC10	1.5	NO	SI	2	NO	NO
12	INGEO	RAC02	1	SI	SI	1	SI	SI
13	DECEP	RAC10	1.4	SI	SI	2	NO	NO
14	VLILI	RAC01	0.3	SI	NO	-	NO	NO
15	TNAPO	RAC05	0.25	NO	SI	1	NO	NO
16	COMFA	RAC02	1	SI	SI	1	SI	SI
17	CCAMP	RAC02	0.45	NO	SI	1	NO	NO
18	AGSUR	RAC02	1.5	NO	SI	1	NO	NO
19	PCR80	RAC02	0.65	SI	SI	1	SI	SI
20	COMFE	RAC01	1.45	NO	NO	-	NO	NO
21	PALME	RAC06	1.9	NO	SI	1.5	NO	NO
22	ITOB	RAC06	1.4	NO	SI	1.5	NO	NO
23	PTAR	RAC10	1.6	NO	SI	2	NO	NO
24	VIVER	RAC09	1.7	SI	NO	-	NO	NO
25	INEM	RAC08	1.9	SI	SI	2	NO	NO
26	FLOR	RAC10	2	SI	SI	2	SI	SI
27	MELEN	RAC02	1.1	SI	SI	1	SI	SI
28	CAMAC	CCAL5	0.9	SI	SI	1.7	NO	NO
29	PILAR	RAC10	1.4	NO	SI	2	NO	NO
30	GUADA	RAC06	1.5	SI	SI	1.5	SI	SI

No	Código	RAC	Período (s) MZSCali	Ensayo de Down Hole	Se registró el Sismo de Pizarro	Período sismo Pizarro	Contiene otro perfil en la misma microzona	Cumple para análisis
31	CAÑAV	RAC04	0.25	NO	SI	0.3	NO	NO
32	TCOLOR	RAC05	0.22	NO	SI	1	NO	NO
33	PTEJAD	RAC01	1.6	NO	NO	-	NO	NO
34	CAPRI	RAC02	0.8	NO	SI	1	NO	NO
35	LIMON	RAC02	1.2	NO	SI	1	NO	NO
36	PTEK15	RAC08	1.4	NO	SI	2	NO	NO
37	EMCALI	RAC10	1.7	NO	SI	2	NO	NO
38	TCALI	CCAL5	0.9	NO	SI	1.7	NO	NO
39	PRADOS	CCAL5	1.6	NO	SI	1.7	NO	NO

Figura 39 Mapa de localización de los perfiles estratigráficos y estaciones seleccionadas (MSZCali, 2005)



ANEXO 4

Perforación: VELÓDROMO P3

Lugar: Velódromo

Periodo: 1.3 s

Estación: RAC03

Microzonasísmica: 4C

Componente con la máxima aceleración: NS

VELÓDROMO

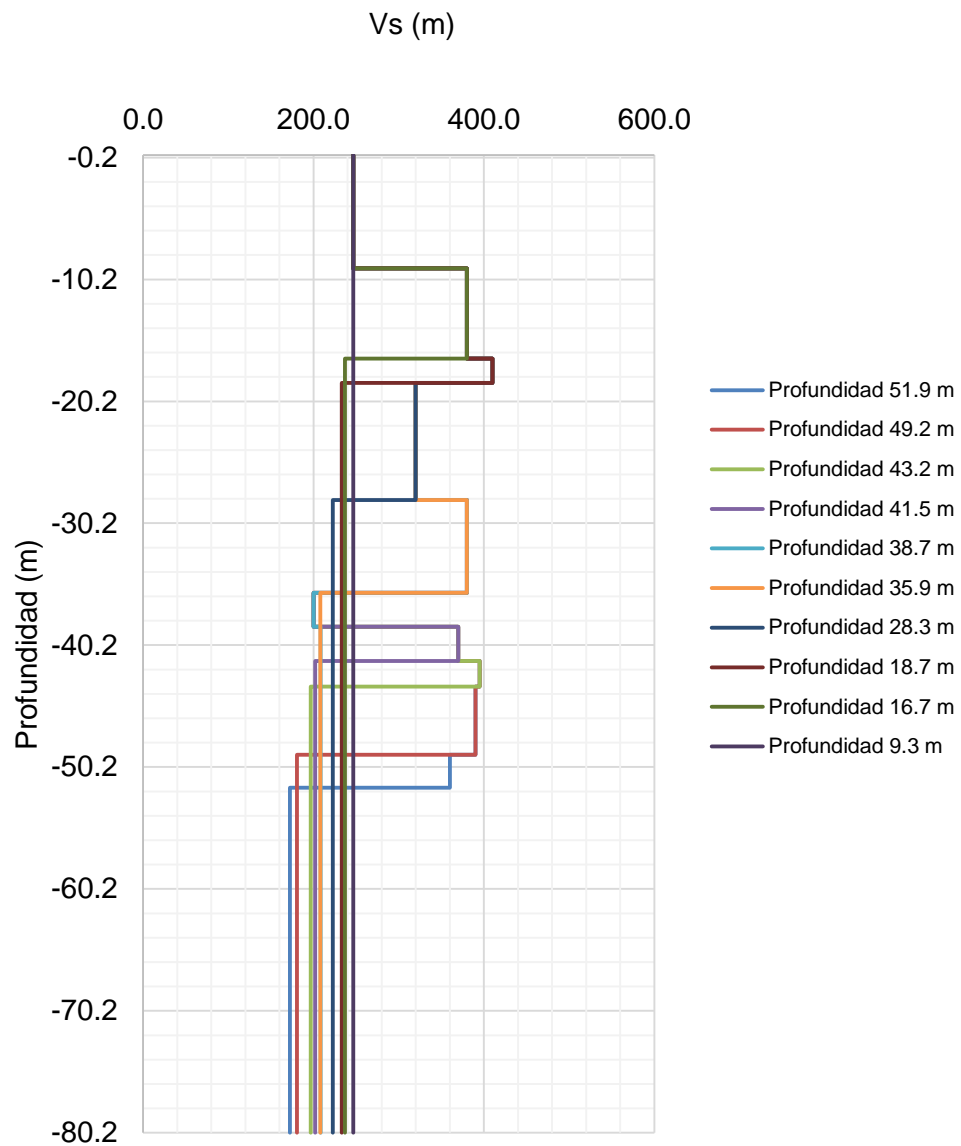


Figura 40 Perfil estratigráfico Velódromo

Perforación: PANAMERICANAS P4
Lugar: Canchas Panamericanas
Periodo: 1.5 s
Estación: RAC06
Microzonasísmica: 4C
Componente con la máxima aceleración: EO

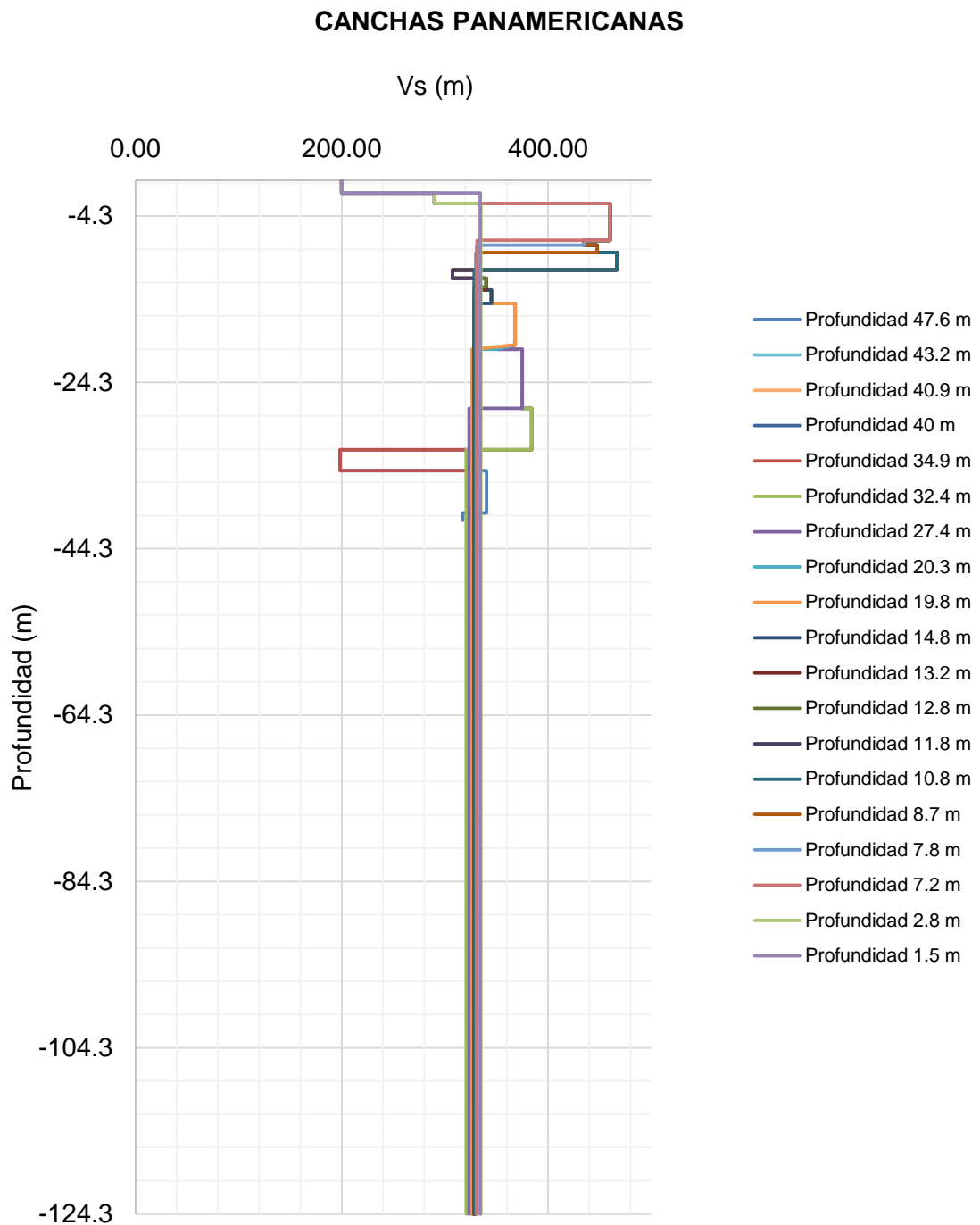


Figura 41 Perfil estratigráfico Canchas Panamericanas

Perforación: INGEOMINAS P12

Lugar: INGEOMINAS Univalle

Periodo: 1 s

Estación: RAC02

Microzonasísmica: 4D

Componente con la máxima aceleración: NS

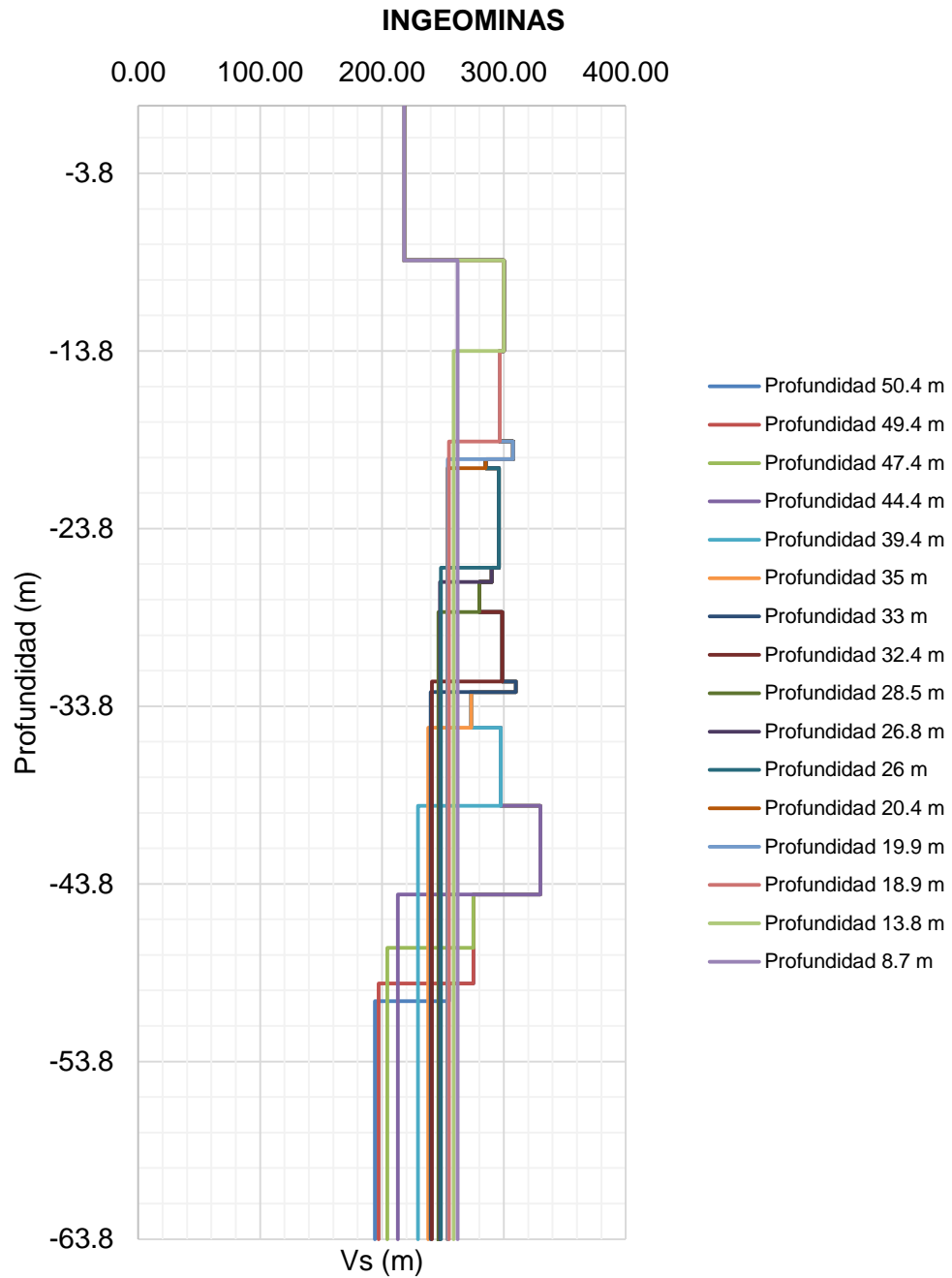


Figura 42 Perfil estratigráfico INGEOMINAS

Perforación: PASOANCHO P19

Lugar: Av Pasoancho con Cr 80

Periodo: 1 s

Estación: RAC02

Microzonasísmica: 4D

Componente con la máxima aceleración: NS

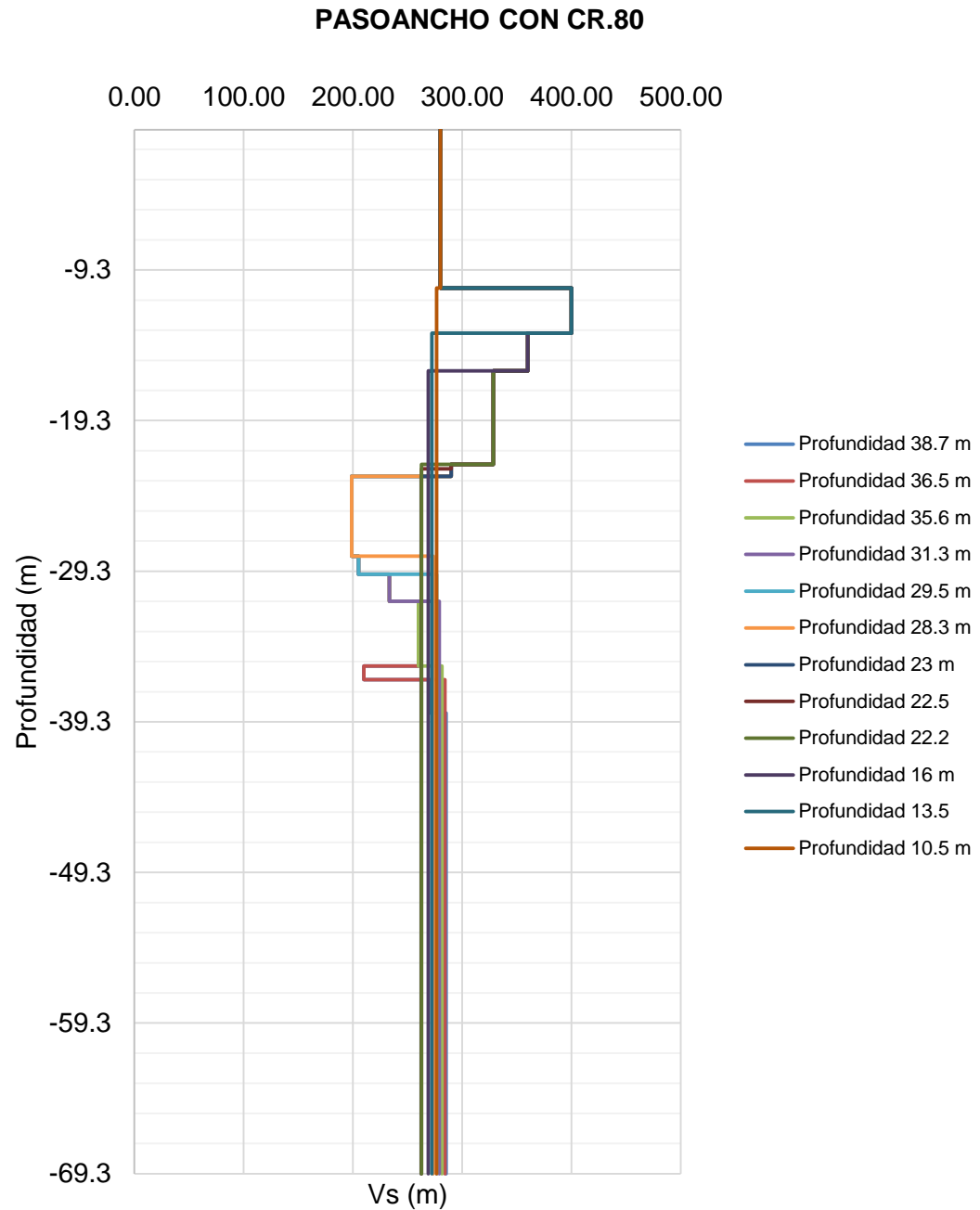


Figura 43 Perfil estratigráfico Pasoancho con Carrera 80

Perforación: MELENDEZ P27

Lugar: Melendez (Detrás de Makro)

Periodo: 1 s

Estación: RAC02

Microzonasísmica: 5

Componente con la máxima aceleración: NS

MELÉNDEZ

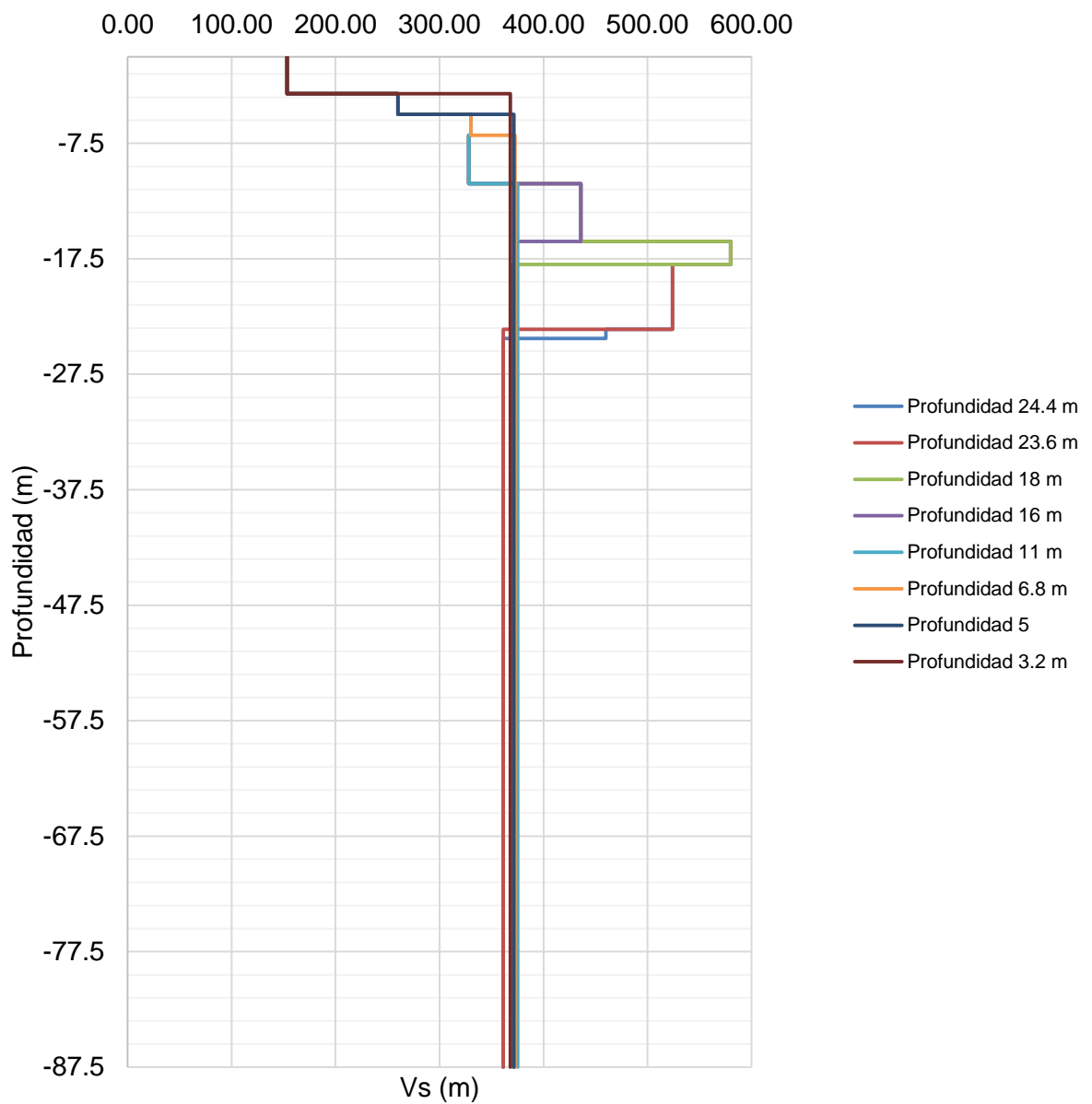


Figura 44 Perfil estratigráfico Meléndez

Perforación: GUADALUPE P30
Lugar: Brisas de Guadalupe (56 con 14)
Periodo: 1.5 s
Estación: RAC06
Microzonasísmica: 5
Componente con la máxima aceleración: EO

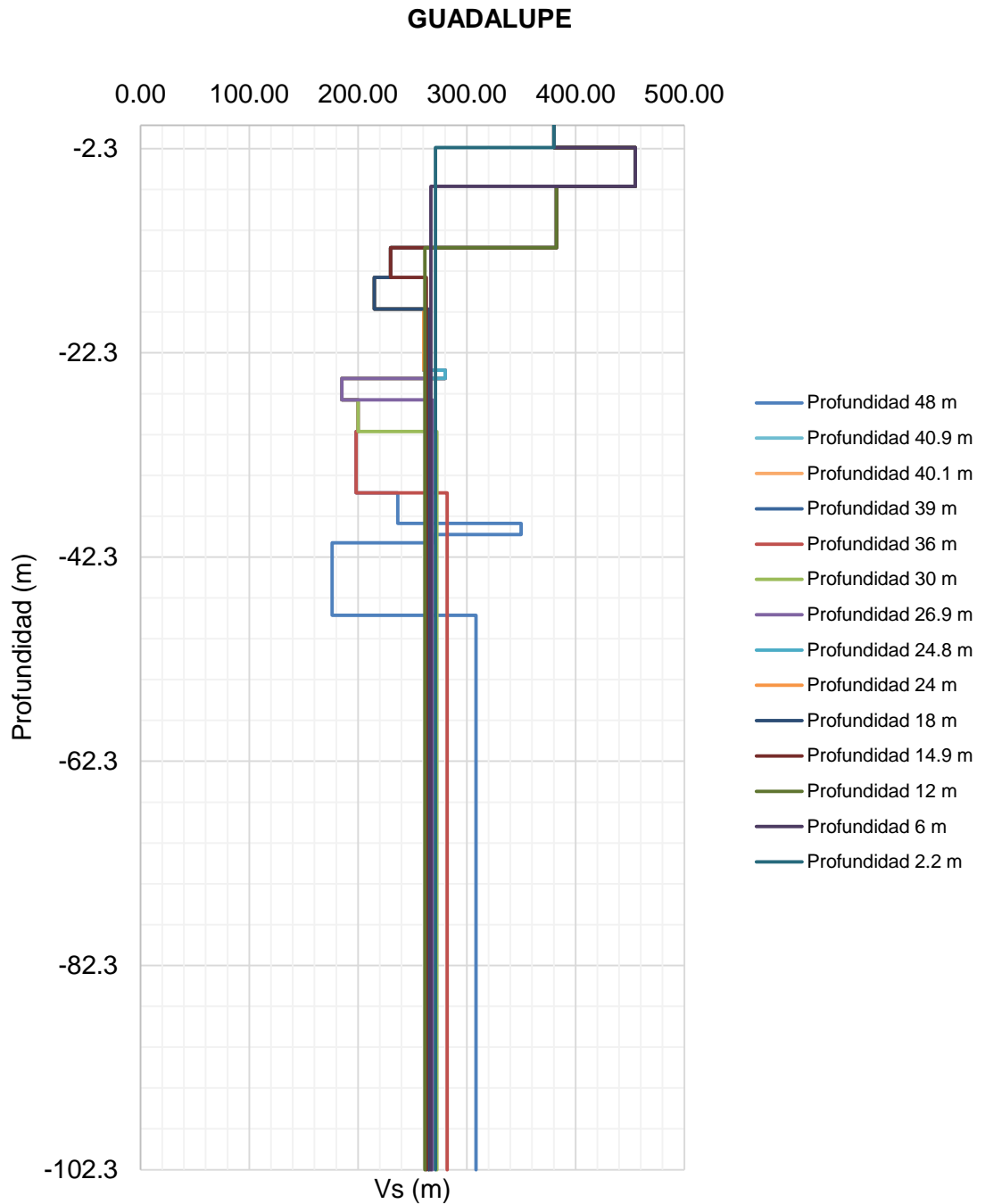


Figura 45 Perfil estratigráfico Guadalupe

Perforación: NAVARRO P1

Lugar: Navarro

Periodo: 2 s

Estación: RAC11

Microzonasísmica: 6

Componente con la máxima aceleración: EO

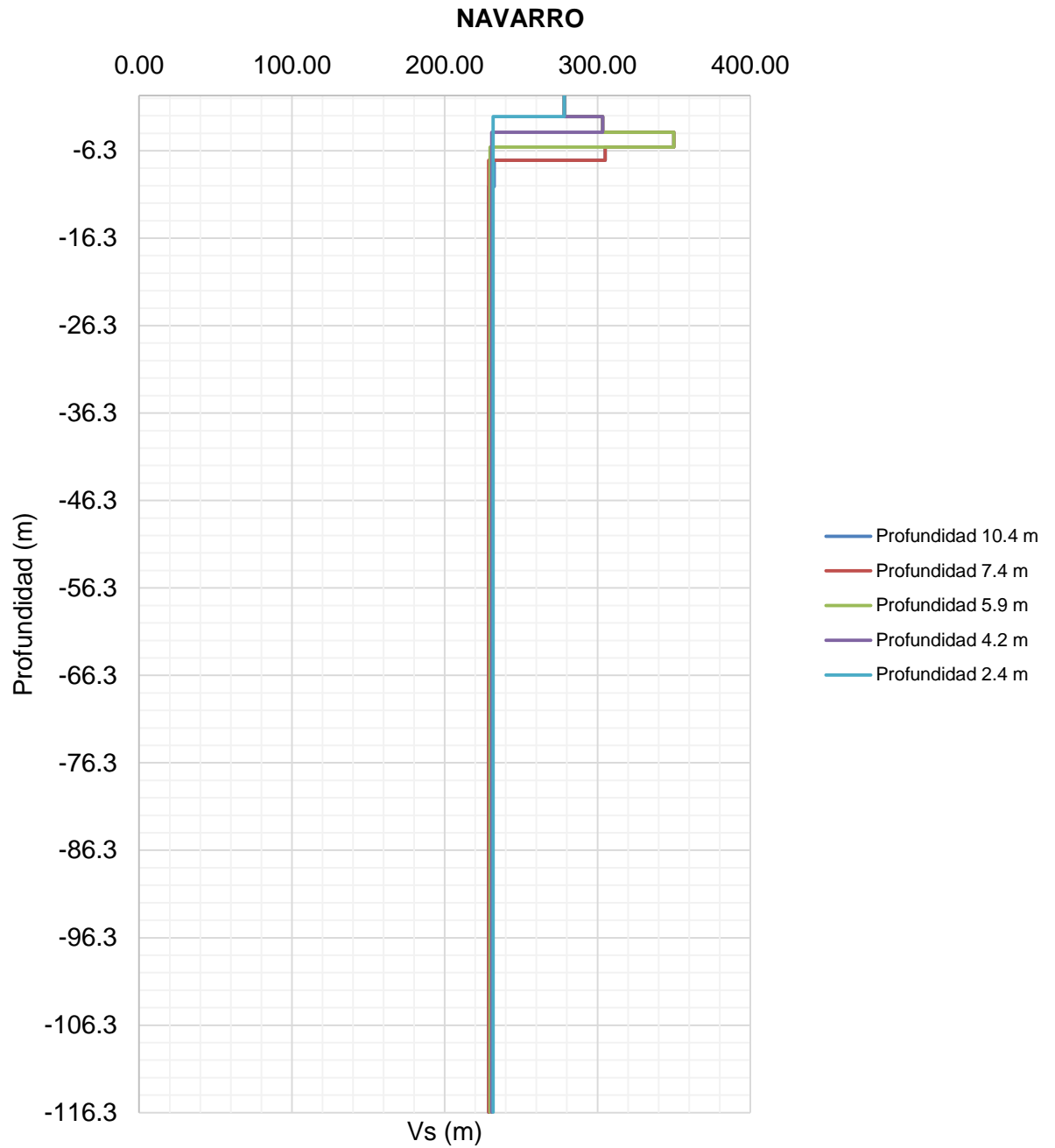


Figura 46 Perfil estratigráfico Navarro

Perforación: FLORALIA P26

Lugar: Centro Recreacional Floralia

Periodo: 2 s

Estación: RAC10

Microzonasísmica: 6

Componente con la máxima aceleración: NS

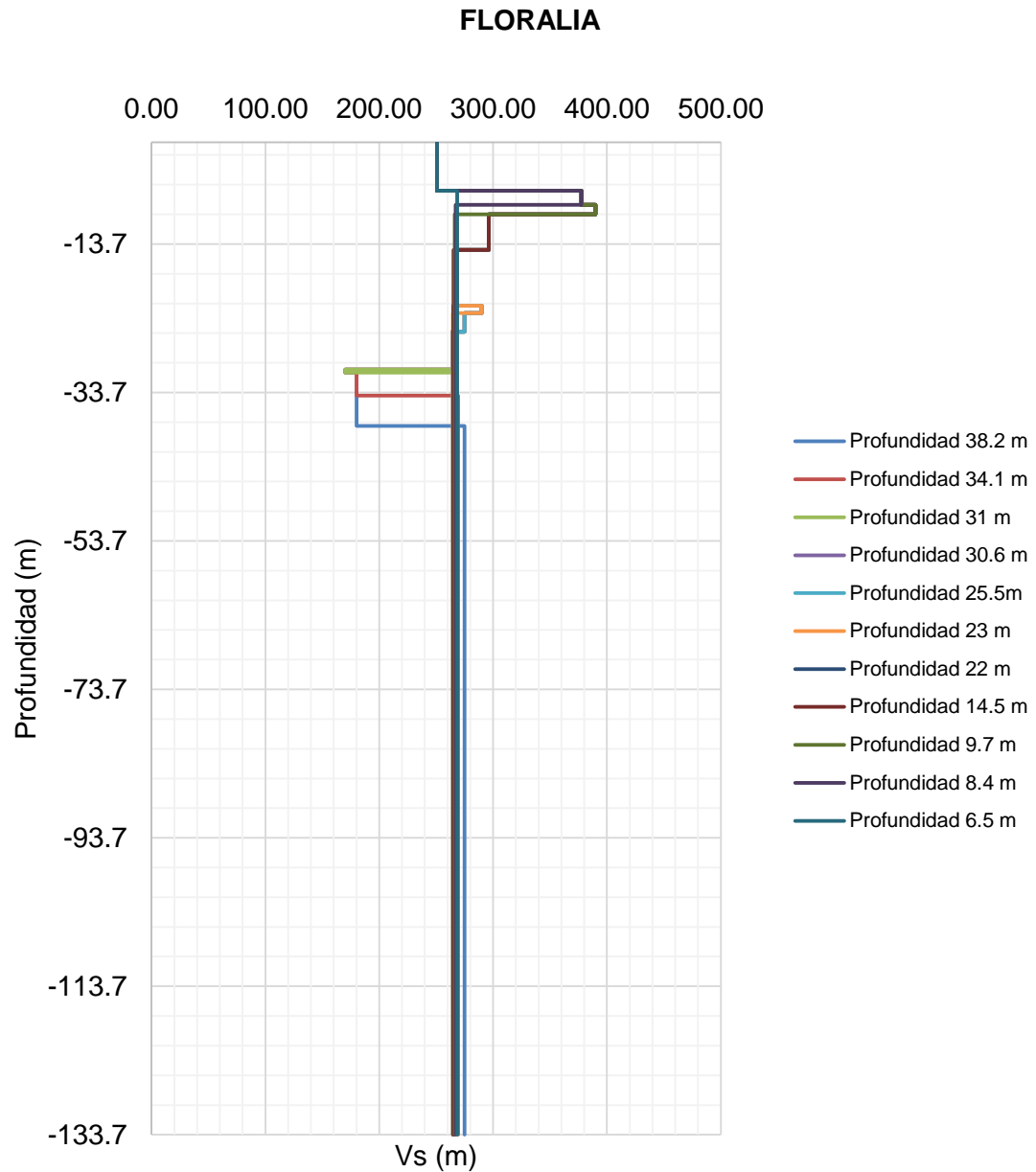


Figura 47 Perfil estratigráfico Floralia

ANEXO 5

Tabla 13 Datos del perfil estratigráfico Velódromo

VELÓDROMO				
Profundidad (m)	Espesor (m)	Vs (m/s)	Vs Promedio (m/s)	Material tipo
9.3	9.3	246.7	246.67	M3
16.7	7.4	380.0	292.08	M5
18.7	2.0	410.0	301.35	M3
28.3	9.6	320.0	307.43	C5
35.9	7.6	380.0	320.38	M2
38.7	2.8	200.0	307.01	P1
41.5	2.8	370.0	310.58	M5
43.6	2.1	395.0	313.81	M2
49.2	5.6	390.0	320.94	S2
51.9	2.7	360.0	322.77	M2

Tabla 14 Datos perfil estratigráfico Canchas Panamericanas

CANCHAS PANAMERICANAS				
Profundidad (m)	Espesor (m)	Vs (m/s)	Vs Promedio (m/s)	Material tipo
1.5	1.5	200.0	200.00	P2
2.8	1.3	290.0	233.67	M2
7.2	4.4	460.0	334.14	C6
7.8	0.6	435.0	340.21	M1
8.7	0.9	447.5	348.86	S3
10.8	2.1	466.7	366.87	G3
11.8	1.0	307.5	360.96	M3
12.8	1.0	340.0	359.23	M1
13.2	0.4	340.0	358.62	G3
14.8	1.6	345.0	357.09	M3
19.8	5.0	367.9	359.77	C6
20.3	0.5	350.0	359.52	P1
27.4	7.1	375.0	363.41	M2
32.4	5.0	384.0	366.44	C3
34.9	2.5	198.3	345.46	S1
40	5.1	340.4	344.81	M2
40.9	0.9	317.5	344.16	S1
43.2	2.3	161.3	324.56	M2
47.6	4.4	171.7	299.87	S1

Tabla 15 Datos del perfil estratigráfico INGEOMINAS

INGEOMINAS				
Profundidad (m)	Espesor (m)	Vs (m/s)	Vs Promedio (m/s)	Material tipo
8.7	8.7	218.00	218.00	M3
13.8	5.1	300.00	242.50	S3
18.9	5.1	296.67	255.06	M3
19.9	1	307.50	257.27	G3
20.4	0.5	285.00	257.88	M3
26	5.6	296.00	265.24	G3
26.8	0.8	290.00	265.92	M1
28.5	1.7	280.00	266.72	G3
32.4	3.9	298.75	270.20	S1
33	0.6	310.00	270.84	M2
35	2	273.33	270.98	M1
39.4	4.4	297.50	273.70	G2
44.4	5	330.00	279.06	S1
47.4	3	275.00	297.45	M1
49.4	2	275.00	295.74	M2
50.4	1	255.00	294.10	P1

Tabla 16 Datos del perfil estratigráfico Pasoancho con Cr.80

PASOANCHO CON CR.80				
Profundidad (m)	Espesor (m)	Vs (m/s)	Vs Promedio (m/s)	Material tipo
10.5	10.5	280.00	280.00	C4
13.5	3	400.00	300.00	M3
16	2.5	360.00	308.02	C4
22.2	6.2	328.33	313.44	C2
22.5	0.3	290.00	313.10	G3
23	0.5	290.00	312.56	M2
28.3	5.3	198.89	282.34	G3
29.5	1.2	205.00	278.07	M2
31.3	1.8	233.33	275.04	G3
35.6	4.3	260.00	273.13	S1
36.5	0.9	210.00	267.69	M1
38.7	2.2	270.00	257.74	G3

Tabla 17 Datos del perfil estratigráfico Meléndez

MELEN				
Profundidad (m)	Espesor (m)	Vs (m/s)	Vs Promedio (m/s)	Material tipo
3.2	3.2	153.33	153.33	C1
5	1.8	260.00	179.90	S3
6.8	1.8	330.00	204.53	C1
11	4.2	328.00	238.86	M1
16	5	435.83	278.14	G3
18	2	420.00	288.99	S2
23.6	5.6	524.00	323.41	G3
24.4	0.8	350.00	324.21	M2

Tabla 18 Datos del perfil estratigráfico Guadalupe

GUADALUPE				
Profundidad (m)	Espesor (m)	Vs (m/s)	Vs Promedio (m/s)	Material tipo
2.2	2.2	380.00	380.00	C1
6	3.8	455.00	424.29	M3
12	6	382.50	402.31	G3
14.9	2.9	230.00	351.12	M5
18	3.1	215.00	316.60	M2
24	6	260.50	300.42	S1
24.8	0.8	280	299.72	P1
26.9	2.1	185	285.88	M2
30	3.1	200	273.73	G1
36	6	198.33	257.42	M2
39	3	236.67	255.70	S1
40.1	1.1	350	257.60	M2
40.9	0.8	270	257.83	P1
48	7.1	176.25	237.15	P2

Tabla 19 Datos del perfil estratigráfico Navarro

NAVARRO				
Profundidad (m)	Espesor (m)	Vs (m/s)	Vs Promedio (m/s)	Material tipo
2.4	2.4	278.33	278.33	C1
4.2	1.8	303.33	288.52	M1
5.9	1.7	350.00	303.90	S1
7.4	1.5	305.00	304.13	C1
10.4	3	232.50	279.31	S1

Tabla 20 Datos del perfil estratigráfico Floralia

FLORALIA				
Profundidad (m)	Espesor (m)	Vs (m/s)	Vs Promedio (m/s)	Material tipo
6.5	6.5	250.56	250.56	C1
8.4	1.9	377.50	271.18	S3
9.7	1.3	390.00	282.73	G3
14.5	4.8	296.25	287.06	S1
22	7.5	267.86	280.21	S2
23	1	290.00	280.63	M1
25.5	2.5	275.00	280.06	G3
30.6	5.1	264.00	277.25	G1
31	0.4	170.00	275.01	S2
34.1	3.1	180.00	262.42	C2
38.2	4.1	180.00	250.04	S2

ANEXO 6

ESPECTROS DE RESPUESTA - VELÓDROMO NS 9.3m

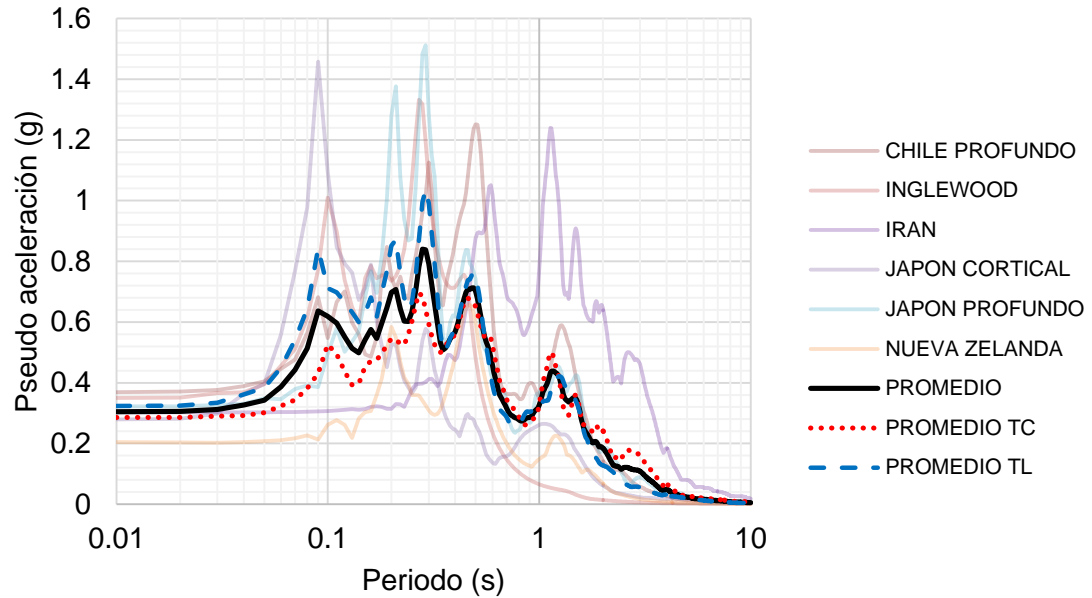


Figura 48 Espectro de respuesta Velódromo

RELACIÓN ESPECTRAL- VELÓDROMO NS 9.3m

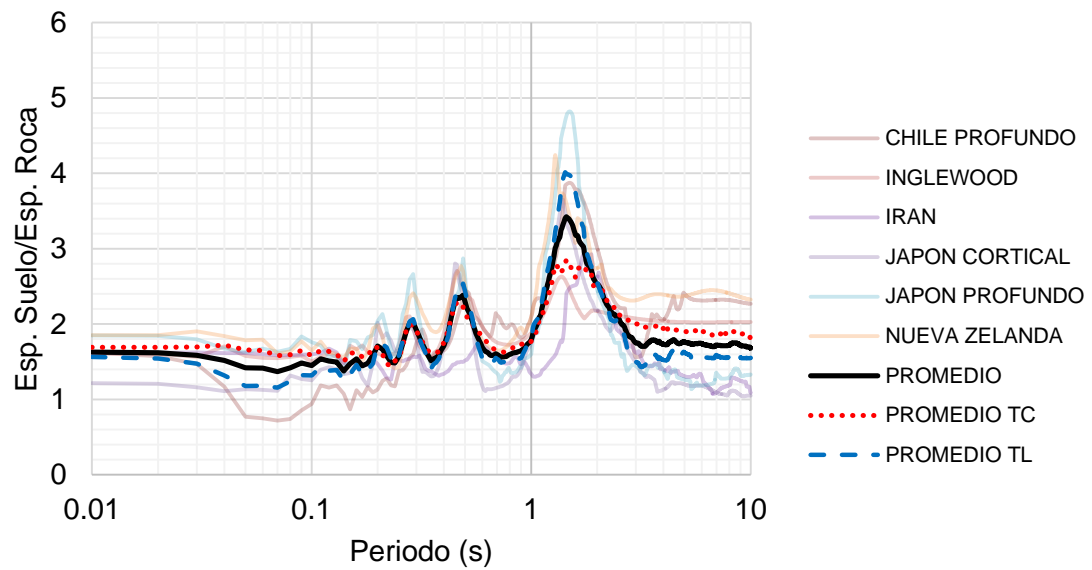


Figura 49 Relación Espectral Velódromo

EUA EN SUPERFICIE - VELÓDROMO NS 9.3m

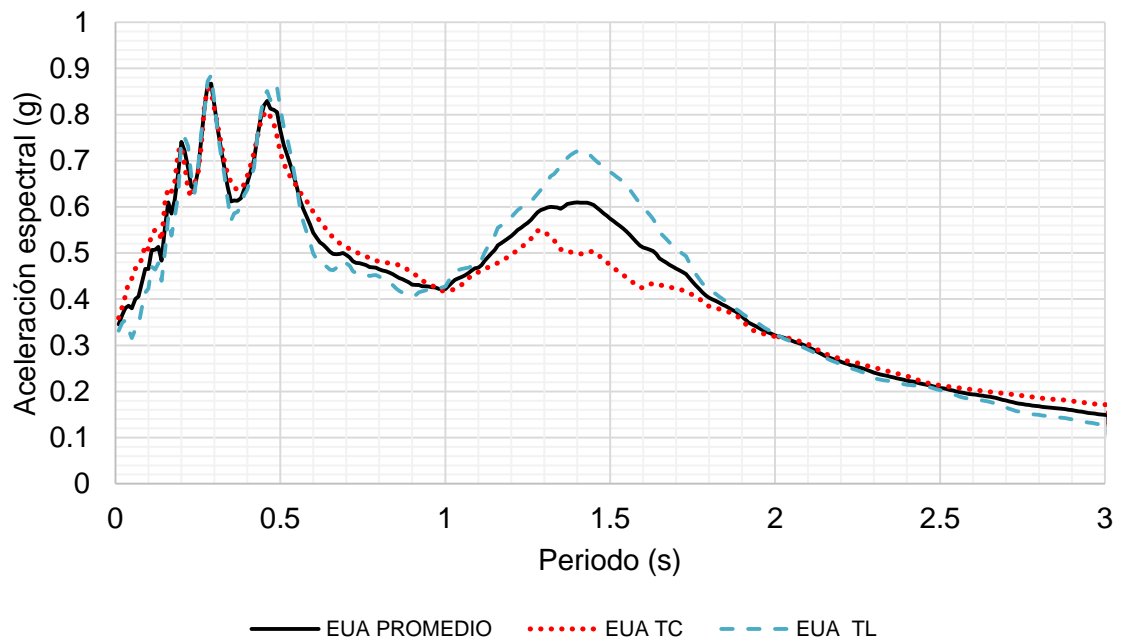


Figura 50 EUA en Superficie Velódromo

ESPECTROS DE RESPUESTA - INGEOMINAS NS 28.5m

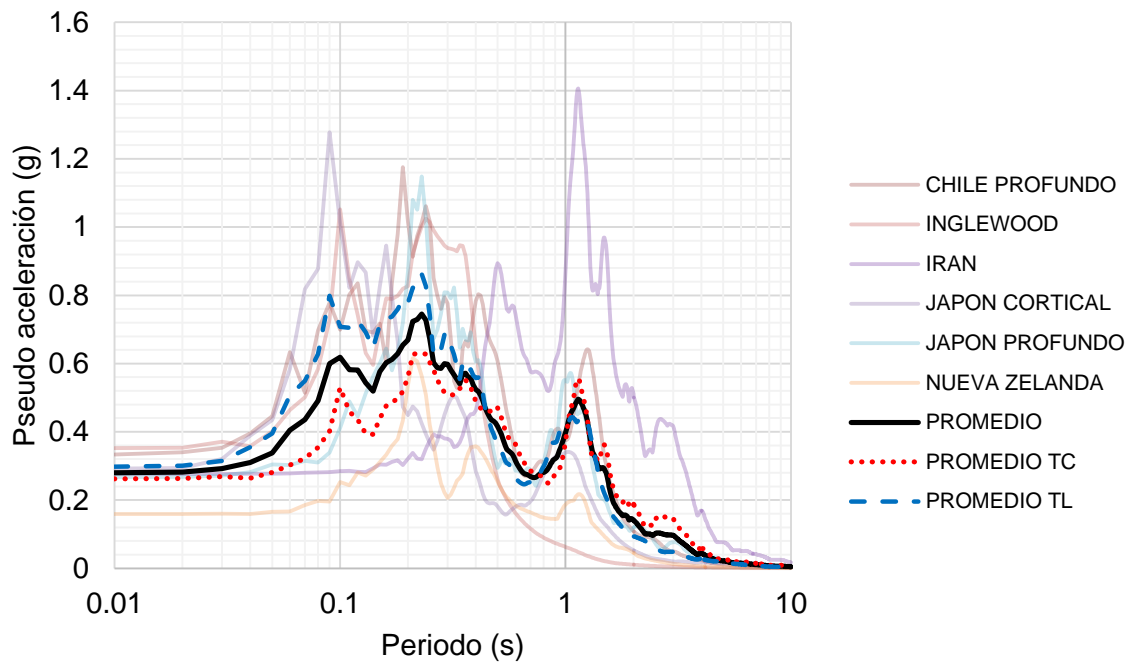


Figura 51 Espectro de respuesta INGEOMINAS

RELACIÓN ESPECTRAL- INGEOMINAS NS 28.5m

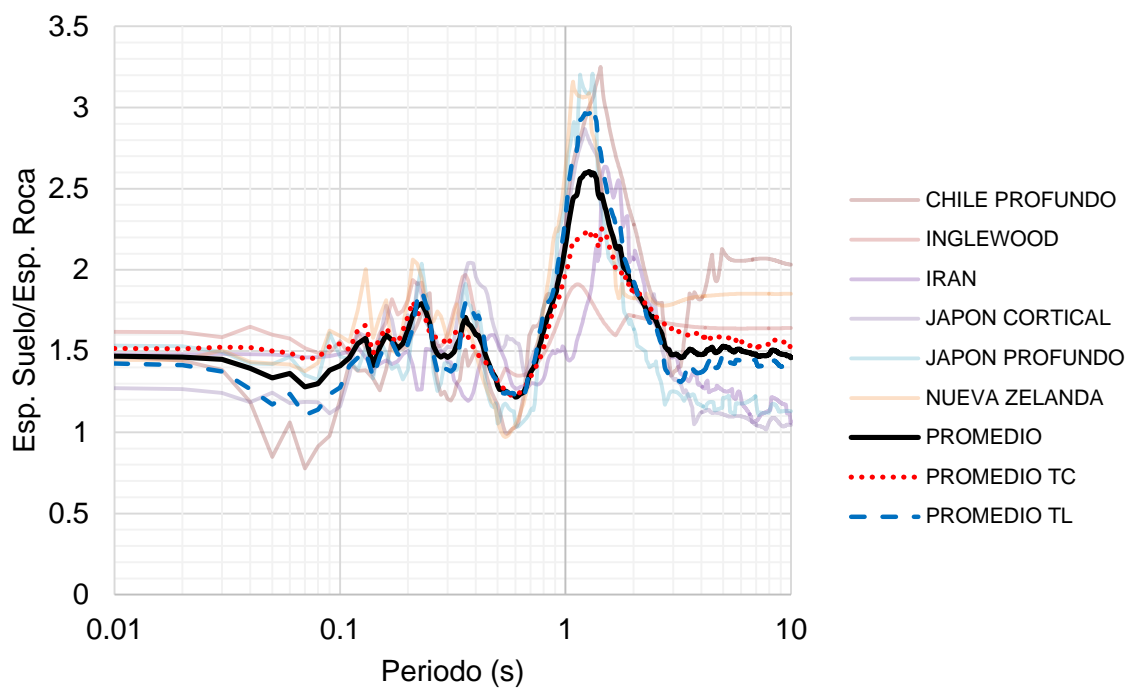


Figura 52 Relación Espectral INGEOMINAS

EUA EN SUPERFICIE - INGEOMINAS NS 28.5m

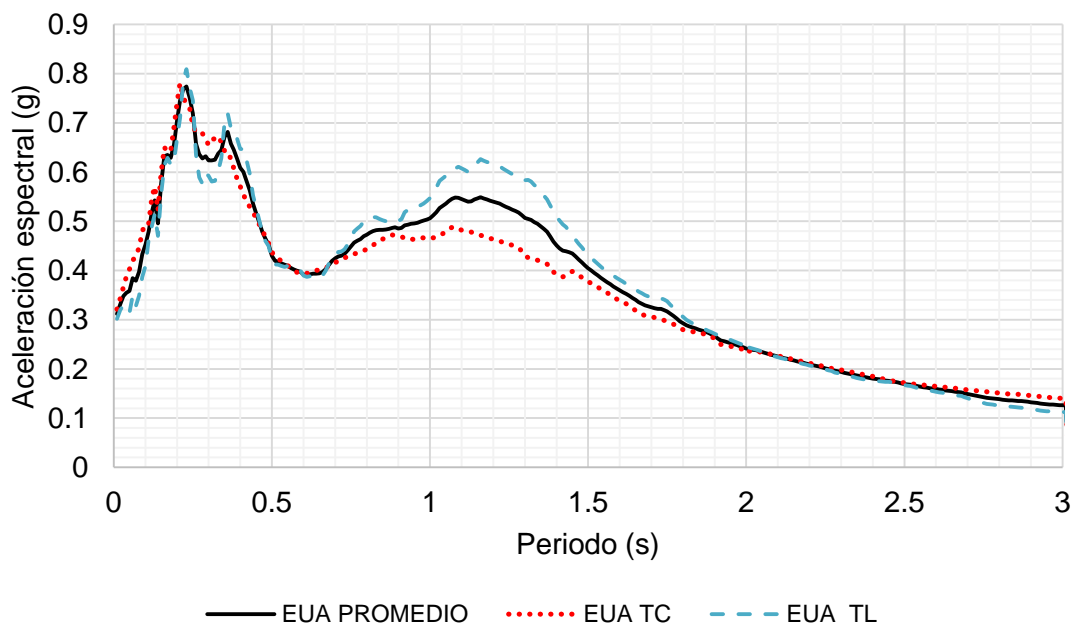


Figura 53 EUA en Superficie INGEOMINAS

ESPECTROS DE RESPUESTA - PASOANCHO CON CR.80 NS 10.5m

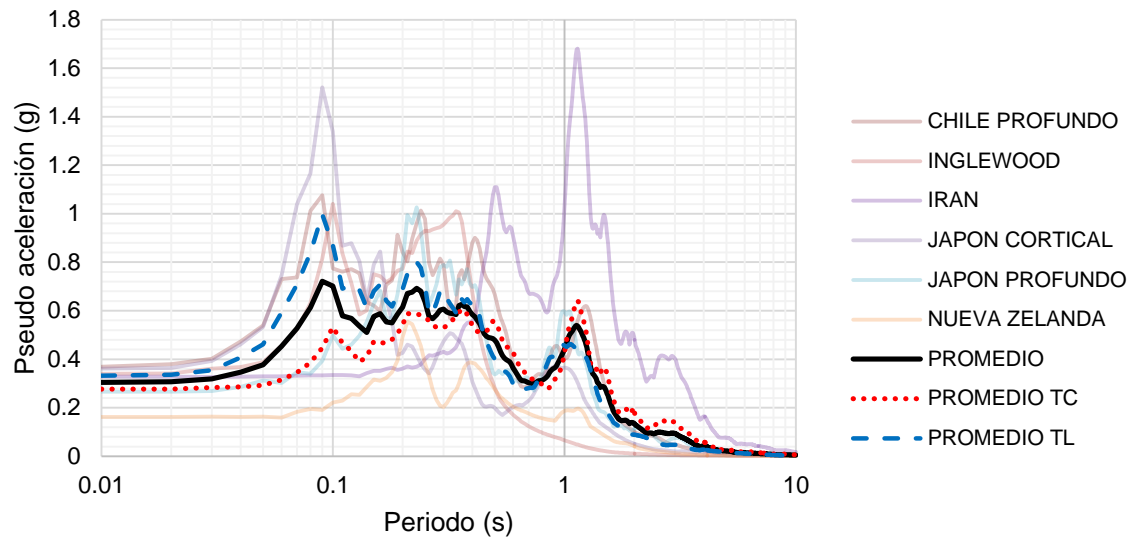


Figura 54 Espectro de respuesta Pasoancho con Cr.80

RELACIÓN ESPECTRAL- PASOANCHO CON CR.80 NS 10.5m

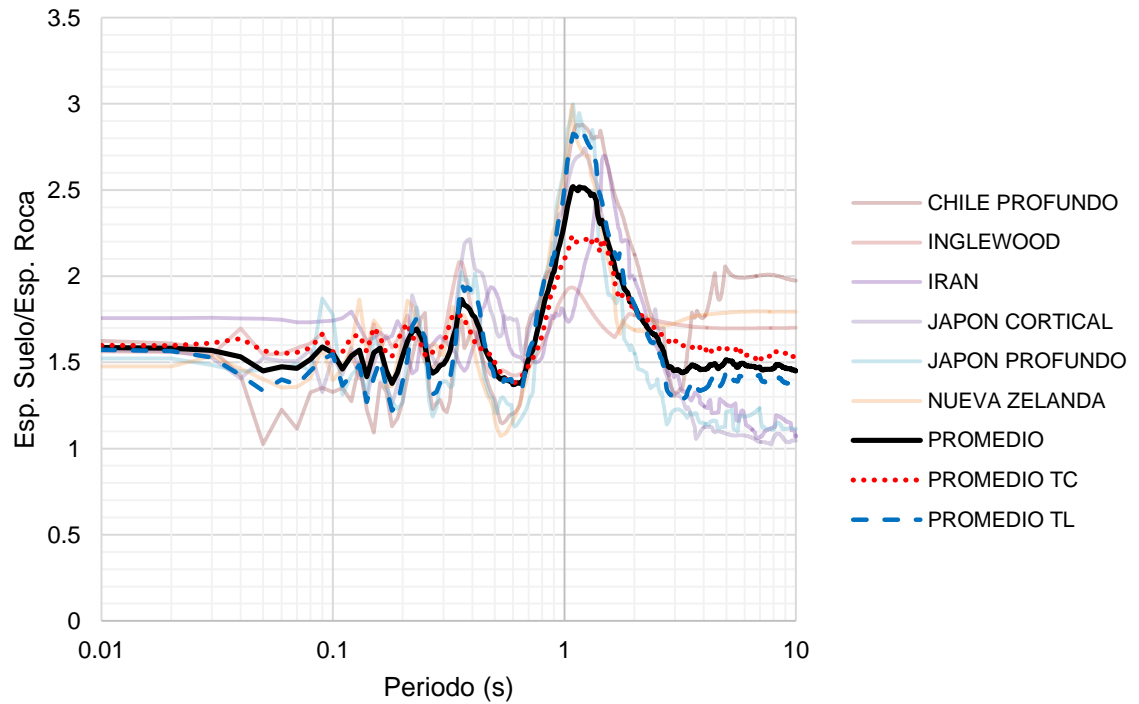


Figura 55 Relación Espectral Pasoancho con Cr.80

EUA EN SUPERFICIE - PASOANCHO CON CR.80 NS 10.5m

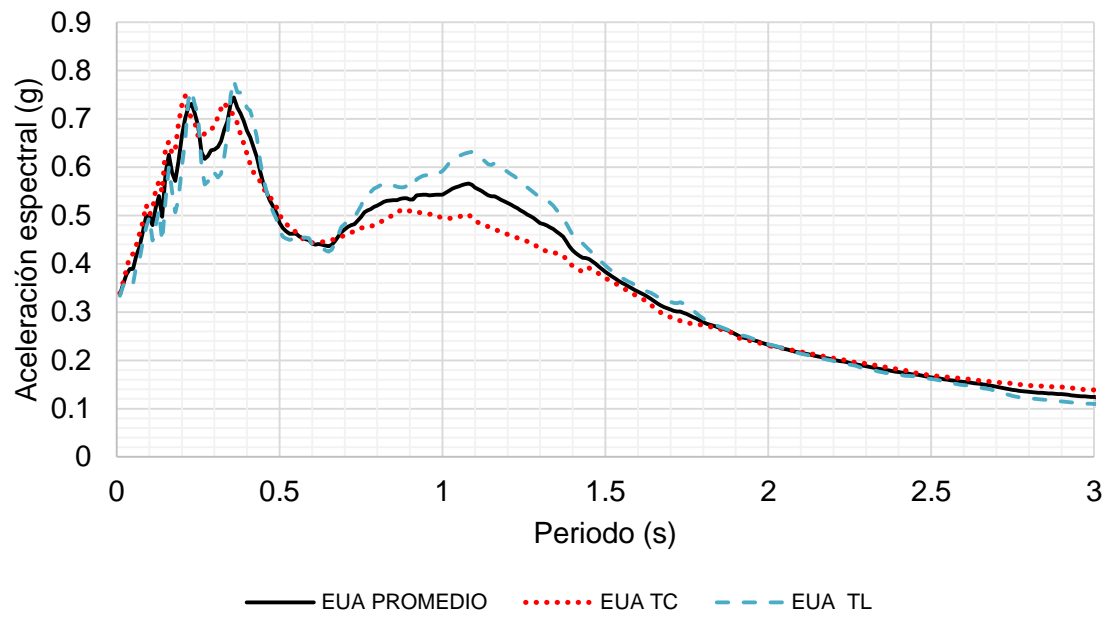


Figura 56 EUA en Superficie Pasoancho con Cr.80

ESPECTROS DE RESPUESTA - MELÉNDEZ NS 18m

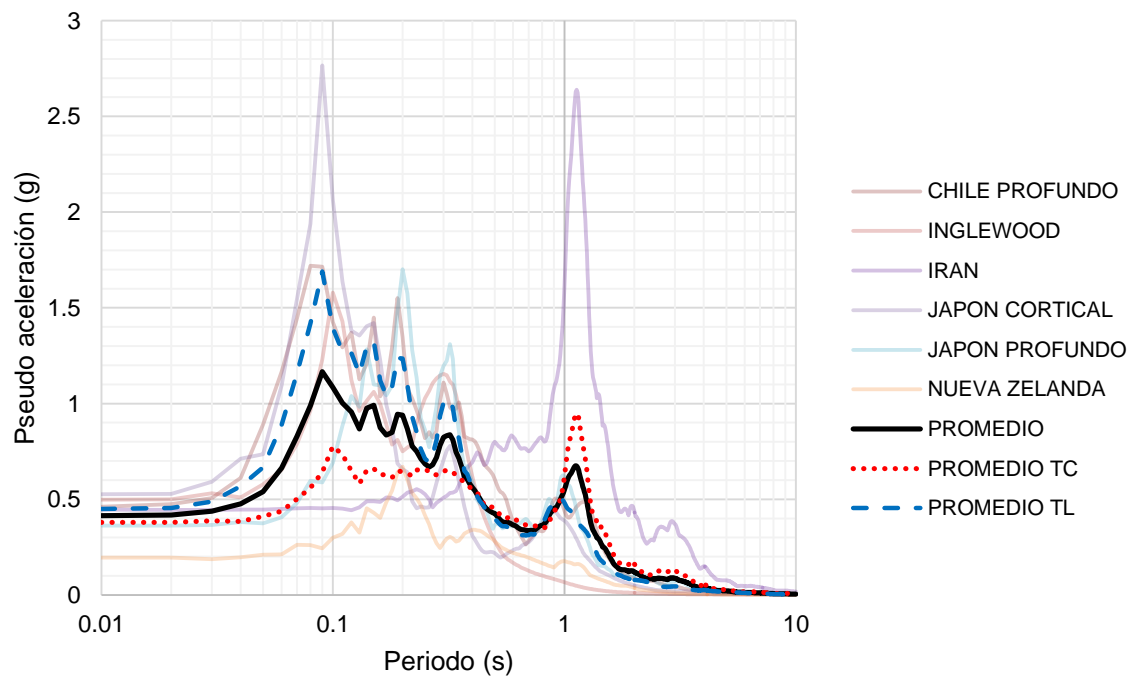


Figura 57 Espectro de respuesta Meléndez

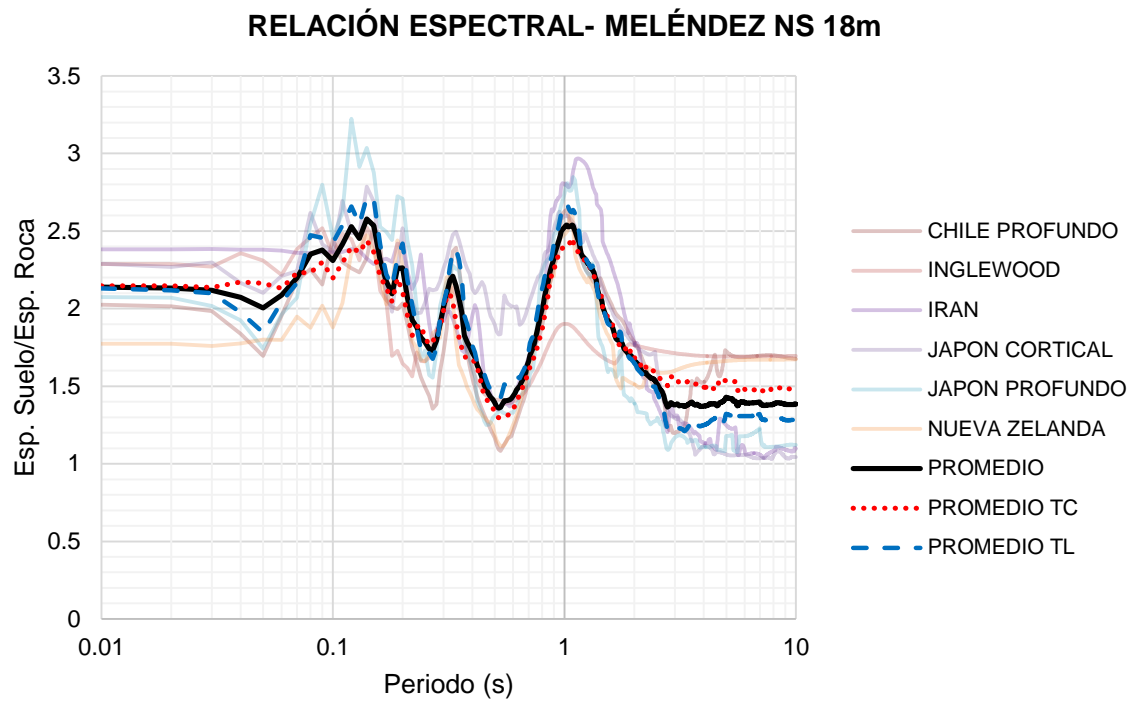


Figura 58 Relación Espectral Meléndez

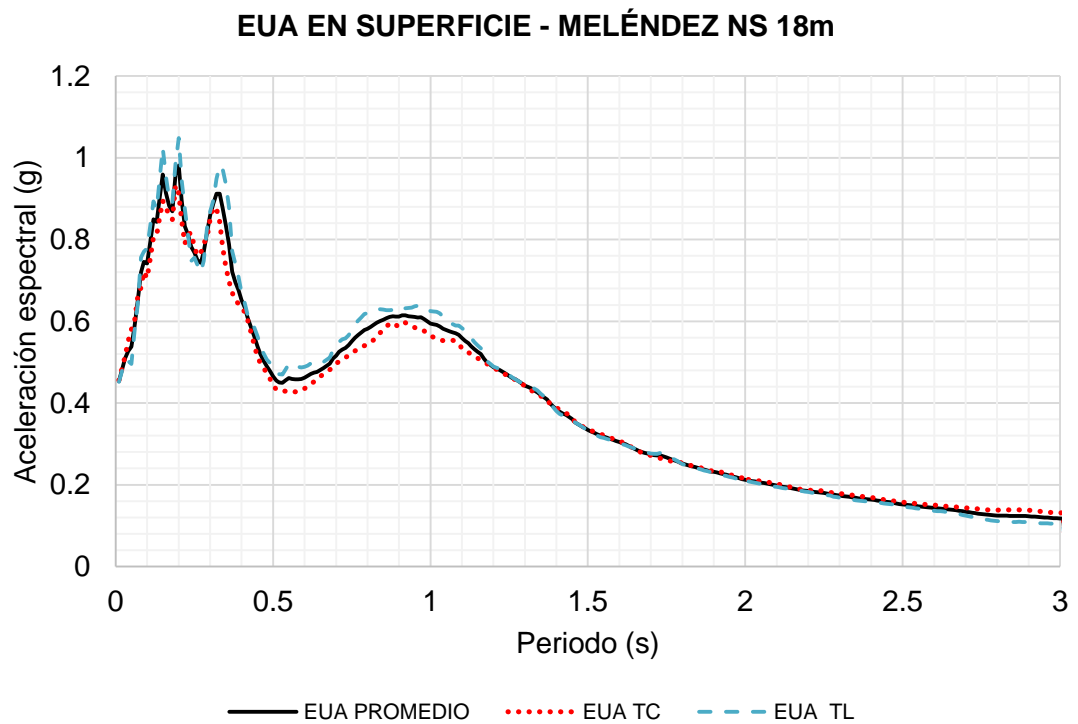


Figura 59 EUA en Superficie Meléndez

ESPECTROS DE RESPUESTA - NAVARRO EO 5.9m

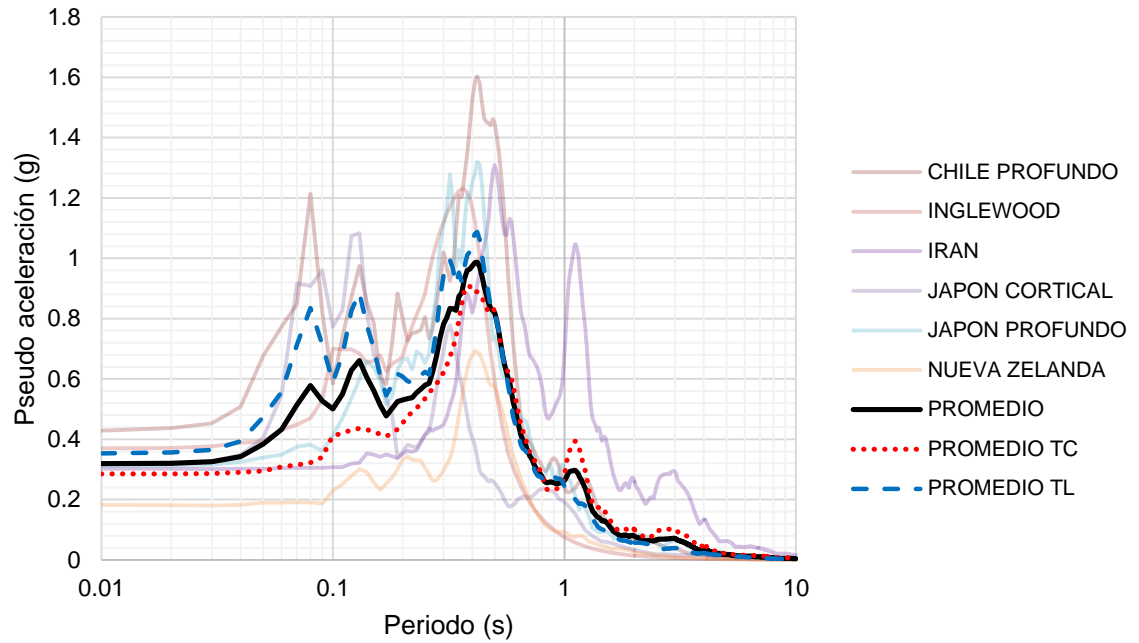


Figura 60 Espectro de respuesta Navarro

RELACIÓN ESPECTRAL- NAVARRO EO 5.9m

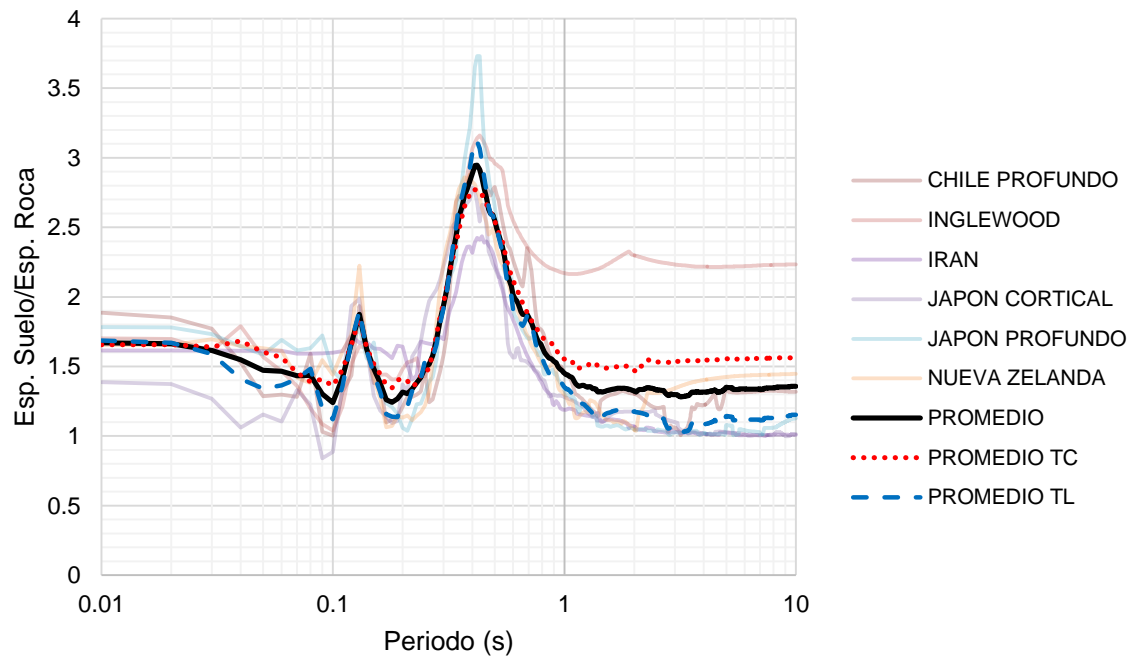


Figura 61 Relación Espectral Navarro

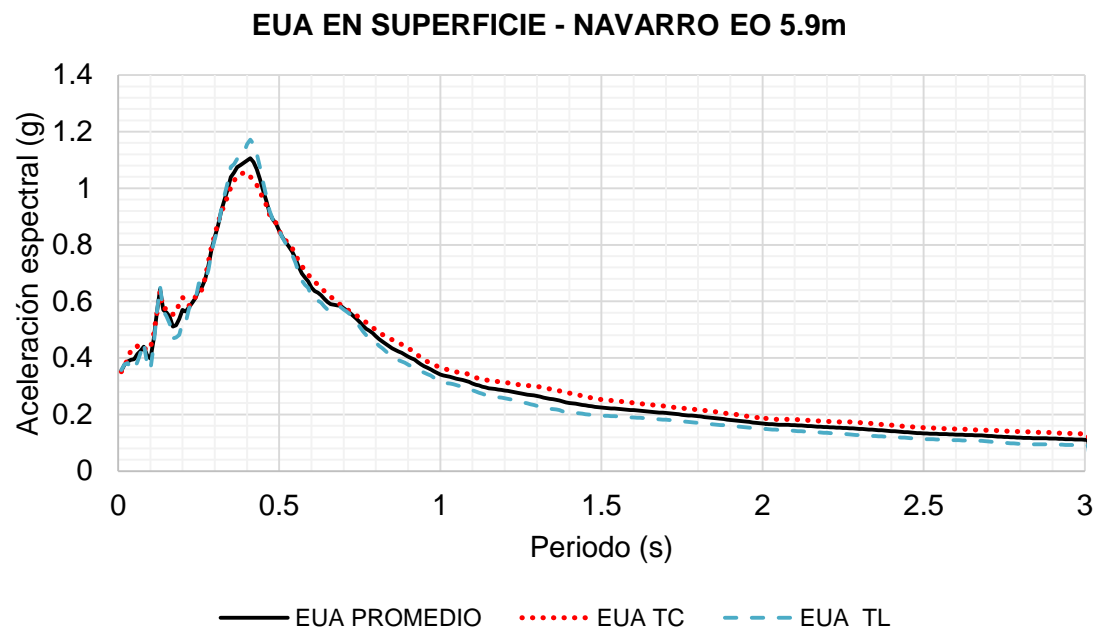


Figura 62 EUA en Superficie Navarro